INGENIERIA DE PROYECTO

Para Plantas de Proceso

HOWARD F. RASE
Associate Professor of Chemical Engineering
The University of Texas

y

M. H. BARROW
Project Engineer
Foster Wheeler Corporation

Ilustraciones originales por:

JAMES R. HOLMES
Assistant Professor of Drawing
The University of Texas

CIA. EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. DE C. V., MEXICO

REPRESENTANTES EN:
Argentina - Bolivia - Colombia - Costa Rica - Chile - Ecuador - El Salvador
España - Estados Unidos - Guatemala - Honduras - Panamá - Paraguay
Perú - Puerto Rico - República Dominicana - Uruguay - Venezuela

Título original en inglés:

PROJECT ENGINEERING of Process Plants

Traducido por:

ARMANDO GARZA CARDENAS, M. Sc.
Ingeniero Mecánico

SALVADOR CARRASCO N.
Ingeniero Químico

JOSE LUIS LEPE
Ingeniero Civil

Edición autorizada por:

JOHN WILEY & SONS, INC.

Library of Congress Catalog Card Number: 57-5929

Décima impresión
julio de 1988

COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. DE C. V.
CALZ. DE TLALPAN NÚM. 5022, MÉXICO 22, D. F.

MIEMBRO DE LA CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA EDITORIAL
Registro Núm. 43

IMPRESO EN MEXICO
PRINTED IN MEXICO

PREFACIO

En los primeros días de la industria química, las nuevas plantas eran proyectadas por un químico y un ingeniero mecánico ayudados por uno o dos dibujantes. El proyecto progresaba lentamente, pero como los procesos eran simples, la tarea se podía completar en un tiempo razonable.

La sencillez de los métodos de proyecto usados en los primeros días de la industria, contrasta en grado sumo con la complejidad del proyecto de las plantas modernas. Es necesario combinar el esfuerzo de especialistas en ingeniería, construcción y administración, logrando una estrecha interrelación entre sí para proyectar y construir una planta moderna.

La supervisión y coordinación de estos especialistas se ha convertido en el trabajo de un experto al que se le designa ingeniero proyectista.

En muchos casos, el ingeniero proyectista ha realizado estudios de ingeniería química, debiendo entender, además, problemas de ingeniería mecánica, eléctrica y civil. Debe estar informado de los sistemas de abastecimiento y tener amplios conocimientos de los métodos de administración de empresas. En el pasado, gran parte de este conocimiento técnico, que no se incluía en la educación del ingeniero químico, se obtenía a base de pruebas o a través de los ingenieros proyectistas experimentados.

El propósito de este libro es reunir datos y los diferentes métodos técnicos que se aplican en el proyecto de plantas discutiendo ideas que muchos ingenieros proyectistas han venido perfeccionando a través de años de práctica. Está escrito desde el punto de vista del ingeniero proyectista, pero no es nuestra intención que le sirva sólo a él o al individuo que aspira a llegar a serlo. Debe ser útil para cualquier ingeniero que proyecte equipo de proceso, puesto que éste debe conocer las teorías y los métodos técnicos usados en el proyecto mecánico, abastecimiento y construcción, además de los principios básicos de la ingeniería química.

También es nuestro propósito que *Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso* sirva como libro de texto para los cursos de pro-

yecto de plantas en la carrera de ingeniería química. En los Estados Unidos, la mayoría de los planes de estudio de ingeniería química incluyen cursos de proyecto de plantas de proceso. El estudiante estima que tales cursos son de incalculable valor por tres razones: primera, lo capacitan para reunir conocimientos dispersos, obtenidos en cursos básicos. Segunda, le proporcionan más oportunidades para concebir ideas originales. Y, tercera, logra una saludable confianza en sí mismo al poder aplicar sus conocimientos en un problema práctico comprensible.

La teoría de la ingeniería química ha quedado magistralmente registrada en textos tales como: *Teoría de los Procesos Químicos*, de Hougen y Watson y *Operaciones Unitarias* de Brown. El estudiante deberá utilizar tales libros como referencia para calcular los procesos de proyecto.

Convertir el cálculo de los procesos en un proyecto de planta funcional es ingeniería de proyecto. El libro *Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso* ha sido planeado para familiarizar al estudiante con los métodos, organización y filosofía de la ingeniería de proyecto.

El libro está dividido en cuatro secciones. Los pasos generales en el proyecto de plantas están bosquejados en la primera sección. Las fases comerciales y legales del proyecto de plantas se discuten en la segunda parte. En la tercera se exponen los principios en que se basa el proyecto del equipo, la elección y proyecto de los cimientos de la estructura y de la tubería. El equipo común a todas las plantas de proceso se considera en detalle, mientras que el equipo especial se trata brevemente en un solo capítulo; aunque se dan referencias a fuentes de información más completas. No se ha tratado de proporcionar un manual o guía para la elección de todos los tipos de equipo. El progreso tecnológico es muy rápido para que una empresa sea de importancia. En su lugar, se hace hincapié en los principios para el proyecto y los fundamentos de los métodos actuales, de tal manera que el lector pueda adquirir bases sólidas para tomar sus propias decisiones.

La última parte del libro es una descripción de las operaciones de construcción y se aconseja a cualquier ingeniero dedicado al proyecto de plantas, que acepte la primera oportunidad que se le presente para observar la construcción de una planta del principio al fin. Después de esta experiencia el ingeniero generalmente mejora como proyectista.

Para aumentar la utilidad del libro para el estudiante y el ingeniero práctico, se ha procurado sujetarse a las siguientes reglas:

1. Se puede entender mejor la relación entre cada fase del proyecto si la secuencia de los capítulos sigue los pasos usuales del diseño de plantas.

2. Se facilita la visualización del equipo por medio de vistas isométricas y fotográficas o con cortes que se complementan con otras vistas.

3. Las ecuaciones de proyecto, a menos que sean completamente empíricas, se desarrollan para que se entiendan sus limitaciones.

4. Sólo se presentan métodos de proyecto usados comúnmente.

5. Algunas veces son preferibles los ejemplos prácticos a las explicaciones detalladas.

6. Se da a través del texto una acumulación tanto de los datos de diseño, como de las fuentes de información.

7. Los estudios económicos se discuten en relación con cada fase del diseño y adquisición de la planta, en vez de hacerlo en capítulos separados y aislados.

8. El ingeniero neófito sale beneficiado con la definición y uso de la terminología común a la industria de la construcción.

Los autores expresan su agradecimiento a las múltiples compañías que contribuyeron con ilustraciones. En el texto se hacen reconocimientos específicos. Asimismo, se agradece al Profr. M. Van Winkle sus múltiples sugestiones útiles.

Austin, Texas

Howard F. Rase
M. H. Barrow

CONTENIDO

CAPITULO 1

EL INGENIERO DE PROYECTO

El diseño y la construcción de una planta de procesos nunca podrán ser llevados a cabo únicamente por profesionales de una sola rama de la ingeniería. Ello debe resultar de los esfuerzos coordinados de ingenieros químicos, mecánicos, electricistas y civiles, así como de químicos y especialistas en otros campos. Sin embargo, este esfuerzo combinado, debe ser dirigido por un solo individuo capaz de guiar a los ingenieros, anticipar los problemas rutinarios y programar las diversas fases del trabajo. Por lo tanto, ha llegado a ser práctica común en industrias de procesos, asignar esta responsabilidad global a un solo individuo llamado ingeniero de proyecto o gerente. Los deberes del ingeniero de proyecto para una planta de procesos, además de requerir de un profundo conocimiento en ingeniería química,* demandan conocimientos de otros campos de la ingeniería, administración de empresas y economía. Aunque no sea necesariamente un experto en alguna de estas ramas, debe tener conocimientos suficientes para coordinar las actividades en todas ellas.

Las compañías más grandes operando en las industrias de procesos, tales como la química y la petrolera, mantienen grandes grupos de tecnólogos en todas las ramas de la ingeniería dedicados a la investigación, desarrollo y mantenimiento de la planta. Estas compañías investigan cualquier proceso nuevo, tanto bajo consideraciones técnicas como económicas. Sin embargo, cuando una compañía en operación decide construir una planta completa o un simple proceso unitario, utiliza los servicios de un ingeniero en jefe y una firma constructora, especializados en tal trabajo.

* Actualmente algunos ingenieros de proyecto tienen entrenamiento en ingeniería mecánica y estudios adicionales en química.

Es posible tener numerosas variantes en la división del trabajo, entre la compañía constructora (contratista) y la compañía a la cual se le está realizando el trabajo (cliente).

1. El contratista se encarga del desarrollo del proceso, del diseño del proceso, de la ingeniería y de la construcción. Ejemplo: (*a*) Clientes extranjeros que desean plantas de diseño norteamericano. (*b*) Firmas industriales de procesos nuevos o de formación reciente. (*c*) Firmas establecidas que no tienen el personal disponible para la participación activa en cualquier fase del diseño o firmas que prefieren tener contratistas que se hagan cargo de todas las fases. (*d*) El contratista provee el proceso patentado o desarrolla uno adecuado.

2. El proceso ha sido desarrollado por el cliente, el contratista y el cliente trabajan conjuntamente en el diseño del proceso, la ingeniería y la construcción a cargo del contratista. Este es un arreglo común cuando el cliente, a través de trabajos en modelos a escala y plantas pilotos, ha desarrollado un proceso y desea construir una planta a escala del prototipo. El contratista utiliza los datos básicos proporcionados por el cliente.

3. Todo el diseño del proceso ha sido desarrollado por el cliente. Cuando éste cuenta con personal adecuado para el diseño de procesos, el cual ha estado en estrecho contacto con un proceso, a menudo es aconsejable que este grupo provea el diseño completo del proceso al contratista. Sin embargo, no es raro que el cliente solicite al contratista para que compruebe su diseño.

Es posible tener otras variaciones de la forma de compartir la responsabilidad. Sin embargo, es importante notar que el papel desempeñado por el ingeniero de proyecto es extremadamente importante cualquiera que sea el arreglo. Cuando tanto el contratista como el cliente son participantes, el ingeniero de proyecto del cliente y el ingeniero de proyecto del contratista, tienen esencialmente deberes paralelos; la Fig. 1-1 delinea las responsabilidades de ambos.

El ingeniero de proyecto del cliente debe proveer al ingeniero de proyecto del contratista, toda la información concerniente a los requisitos y preferencias del cliente. Debe comprobar y aprobar todos los diseños y escuchar los comentarios de varios grupos de diseño y operación de su propia organización. El ingeniero de proyecto del contratista debe ser responsable de hacer llegar la información a los diferentes grupos de su propia organización, para salvaguardar tanto los intereses del cliente como los del contratista en todas las decisiones ingenieriles, obligaciones contractuales y sobre todo a fin de que la planta sea terminada a tiempo y opere conforme a las especificaciones dadas.

Nuevamente con referencia a la Fig. 1-1, los deberes de un ingeniero de proyecto pueden comentarse brevemente, empezando en la parte superior y siguiendo el sentido de movimiento a las manecillas

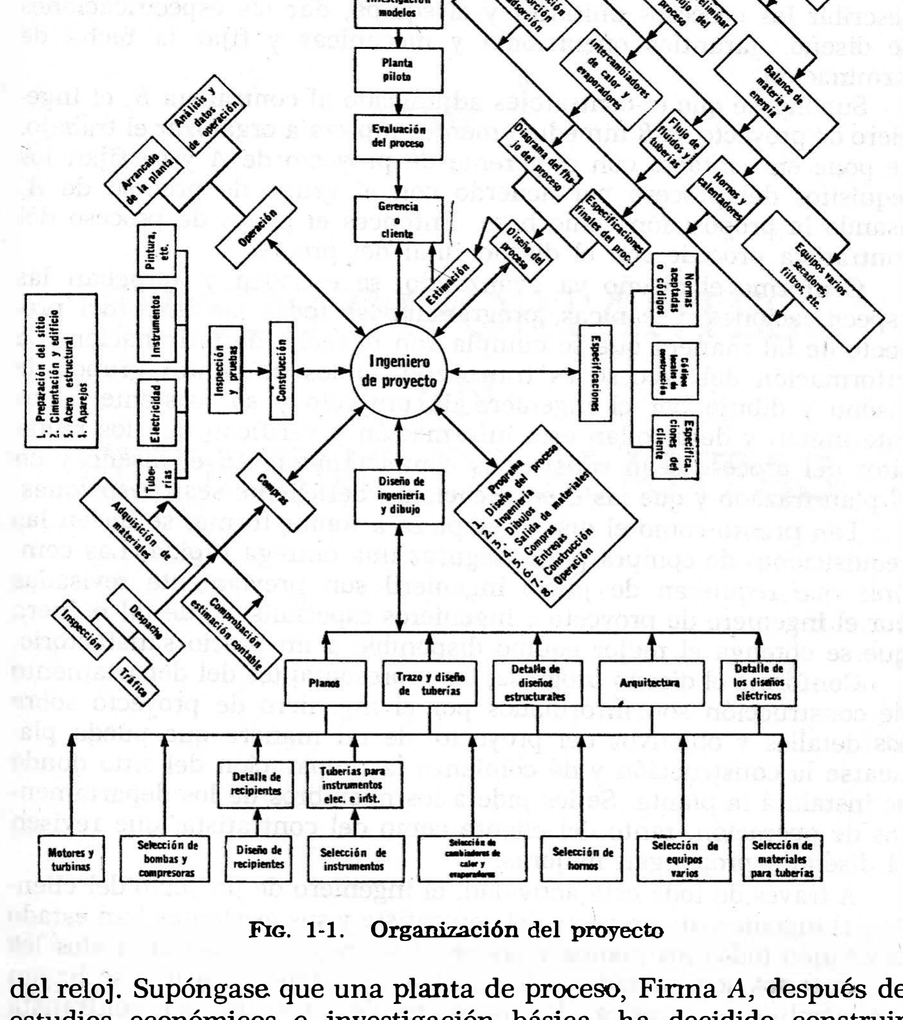


FIG. 1-1. **Organización del proyecto**

del reloj. Supóngase que una planta de proceso, Firma *A*, después de estudios económicos e investigación básica, ha decidido construir una planta. La Firma *A* envía solicitudes a varios contratistas, las cuales son preparadas por el departamento de proceso de la Firma *A* y por su ingeniero de proyecto. Estas incluyen una descripción de la localización propuesta para la planta, los fines del proyecto, la producción requerida y cualquier otra información pertinente para el contratista. El contratista designa un ingeniero de proyecto al trabajo, quien inmediatamente se convierte en punto de enlace entre el cliente y todos los departamentos del contratista. El ingeniero de proyecto trabaja con el diseño del proceso y hace estimaciones del cálculo

del costo del diseño y construcción de la planta propuesta. La estimación se presenta al cliente en forma ordenada. Debe delinear cuidadosamente los deberes y obligaciones del cliente y del contratista, describir los procesos unitarios y el equipo, dar las especificaciones de diseño, garantías operacional y mecánicas y fijar la fecha de terminación.

Supóngase que el contrato es adjudicado al contratista *B*, el ingeniero de proyecto de *B* inmediatamente empieza a organizar el trabajo. Se pone en contacto con el gerente de proyecto de *A* y se fijan los requisitos del proceso por acuerdo con el grupo de proceso de *A*, usando la proposición como base. Entonces el grupo de proceso del contratista procede con el diseño final del proceso.

Conforme el diseño va avanzando, se escriben y aprueban las especificaciones mecánicas, programándose todas las fases del proyecto de tal manera que se cumpla con la fecha de terminación. La información del proceso es transmitida a los diferentes grupos de diseño y dibujo por el ingeniero de proyecto y su asistente. Ellos interpretan y desarrollan esta información y verifican que los requisitos del proceso sean satisfechos completamente en el diseño y en el plan trazado y que las especificaciones del cliente sean respetadas.

Tan pronto como el diseño empieza a tomar forma, se hacen las requisiciones de compra para asegurar una entrega rápida. Las compras que requieran de juicio ingenieril son previamente revisadas por el ingeniero de proyecto e ingenieros especialistas, de tal manera que se obtenga el mejor equipo disponible a un precio satisfactorio.

Conforme el diseño progresa, los representantes del departamento de construcción son informados por el ingeniero de proyecto sobre los detalles y objetivos del proyecto, de tal manera que pueda planearse la construcción y dé comienzo la preparación del sitio donde se instalará la planta. Se les pide a los miembros de los departamentos de operación, tanto del cliente como del contratista, que revisen el diseño y propongan mejoras.

A través de toda esta actividad, el ingeniero de proyecto del cliente y el ingeniero de proyecto del contratista y sus asistentes han estado revisando todos los planos y las requisiciones de material. Todos los comentarios son enviados a los grupos de diseño para que se hagan los cambios necesarios. El ingeniero de proyecto del contratista deberá vigilar que estos cambios sean ejecutados debidamente y que tanto los intereses del cliente como los del contratista sean salvaguardados. Los cambios no deben alterar los requisitos, objetivos del trabajo* o especificaciones del proceso original. De hecho, la responsabilidad del ingeniero de proyecto no termina hasta que el departamento de operación haya demostrado que la planta satisface las especificaciones de diseño y proceso y las garantías mecánicas.

---

* Si el cliente desea cambios en los objetivos de trabajo, deberá pedir estos cambios de acuerdo a las cláusulas del contrato. El contratista puede solicitar hacer cargos adicionales por dichos cambios. (Véase el Cap. 11.)

PARTE 1

PASOS IMPORTANTES EN EL DISEÑO DE PLANTAS

El ingeniero de proyecto coordina y dirige en su totalidad el proyecto de diseño. Su actividad se aumenta después que se ha completado la ingeniería de proceso, pero en muchas ocasiones tiene que participar en las primeras etapas de la planeación del trabajo. Puede ayudar a la gerencia en la localización del sitio donde se construirá la planta y ordenará toda la información preliminar que se tenga. Sin embargo, su trabajo más intenso será durante el periodo del diseño detallado de ingeniería y en la elaboración de planos, ya que es éste el trabajo que culmina en la selección de equipo y producción de planos para usarse en la construcción.

LOCALIZACION DE LA PLANTA

La localización correcta de una planta es tan importante para su buen éxito como la selección de un buen proceso. Debe estudiarse cuidadosamente no sólo la mayoría de los factores tangibles como las disponibilidades de mano de obra y las fuentes de materia prima, sino también, un gran número de factores intangibles que son más difíciles de evaluar.

La selección de una planta debe basarse en un estudio muy detallado en el que deben tomarse en cuenta todos los factores tanto como sea posible. A menudo un estudio así, es costoso, pero las falsas economías en este concepto pueden conducir a grandes pérdidas en el futuro.

Hay abundante literatura sobre localización de plantas, que varía desde las consideraciones prácticas, hasta la teoría de su localización. Los aspectos teóricos son extremadamente interesantes y, en general, provienen de la obra clásica de Weber[13] publicada en 1909 en alemán y traducida al inglés en 1928. Se han publicado muchos esquemas y listas de comprobación excelentes, que ayudan en los estudios para la localización de la planta enumerando los factores que deben considerarse. Aparece al final de este capítulo una lista abreviada de la literatura que existe en esta especialidad. Estas referencias conducen inevitablemente al lector interesado, a toda la literatura sobre localización de plantas.

PROCEDIMIENTO GENERAL

Antes de proceder al estudio de localización de una planta, debe tenerse un conocimiento completo de la organización, del historial,

de los datos sobre costos y de las técnicas de mercado que existen en la compañía. Así, como una familia debe conocer sus propias necesidades cuando compra una casa nueva, una compañía debe también conocerse a sí misma antes de decidir sobre el futuro sitio en que va a construirse una nueva planta. Sin embargo, obtener tal conocimiento no siempre es fácil. En el rápido desarrollo de la industria de proceso, muchas organizaciones han crecido de pequeños negocios familiares hasta grandes empresas corporativas, en un lapso de pocos años. A menudo, no se puede definir la línea divisoria entre organización y buena política durante estos periodos de tremendo crecimiento. Bien vale la pena para una compañía en esta situación, intentar definir su política y su organización, antes de proceder a extenderse a nuevas actividades.

Al idear un procedimiento adecuado para estudiar la localización de una planta debe tomarse una decisión entre dos extremos: el primer extremo consiste en hacer un estudio estadístico completo para el cual se requeriría una década y el otro en un estudio corto basado principalmente en ideas preconcebidas, que carezca de objetividad. Hacer un estudio completo de los miles de lugares posibles para construir la planta es, por supuesto, imposible. Deben pues, encontrarse algunos medios para disminuir el número de posibilidades. Aires[1] ha sugerido el método de la asociación aparente. Una inspección de las plantas construidas del mismo tipo de la que se estudia, indicará a menudo que en el pasado se prefirió otro tipo de ubicaciones. Si hiciéramos preguntas sobre la administración de estas plantas, podríamos saber las condiciones especiales que determinaron la elección de esas ubicaciones. De esta manera se podría limitar el estudio a determinadas zonas.

Muchos procesos tienen uno o más factores predominantes, que sirven para reducir al mínimo el número de posibilidades de ubicación de la planta. Los costos de la materia prima y del transporte pueden ser tan grandes, que obliguen a construir la planta cerca de una fuente de abastecimiento, lo que reduce el número de sitios que hay que estudiar a los que están cerca de las fuentes de materias primas que pueden ser pocos. Las necesidades de mano de obra pueden ser tales, que tengan que excluirse las ciudades de un cierto tamaño, porque solamente una ciudad más grande puede proporcionar el número de trabajadores requerido. Estos y otros factores sirven como agentes reductores efectivos que ahorran tiempo y dinero.

Habiéndose decidido por algunas regiones posibles para la construcción de la planta, el siguiente paso es hacer un estudio detallado de las localizaciones. Este estudio incluye la investigación de todos los factores importantes que influyen y un estudio de costos. No es posible asignar valores monetarios a todos los factores que deben considerarse. Sin embargo, pueden, a menudo, compararse los factores intangibles asignándole a cada uno de éstos un valor numérico

(100, 200, 300, etc.), cuya magnitud dependa de la importancia que se dé al factor que se está considerando. La asignación de los valores numéricos se basa en la opinión, pero ésta puede establecerla la gerencia al principio del estudio, como medida de seguridad, para que la acumulación y presentación de datos se haga en forma objetiva.

Cuando el estudio detallado de varias zonas indica que una de éstas, o una comunidad, es ideal, entonces se elige un sitio específico en esa región. Yaseen[15] ha subrayado la importancia que tiene la elección del sitio específico, después de haber escogido la comunidad. Si al estudiar varias comunidades, se encuentra en una de éstas un sitio que llame la atención en particular, todo el estudio puede depender de esta circunstancia, que puede dar una importancia inmerecida a tal sitio, porque se presenta con frecuencia el hecho de que una o más personas exageren las cualidades de un sitio determinado y aumenten mucho su importancia.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA LOCALIZACION DE UNA PLANTA

Se da a continuación una discusión de los factores importantes que hay que considerar en el estudio de terrenos y sitios para la localización de plantas. Estos factores son: materias primas, transportes, agua industrial, eliminación de desechos, combustible y energía, mano de obra, clima y factores de la comunidad.

Materias primas

La elección de la fuente de las materias primas, aunque no esté en el sitio de la planta, es un factor extremadamente importante para su ubicación final. En muchos casos, el estudio de la situación de las materias primas puede preceder al análisis de los otros factores para la localización de la planta, puesto que para el trabajo de una planta piloto en un proceso se requiere cuando menos saber cuál va a ser el abastecimiento final de materia prima. El trabajo del desarrollo de un proceso y los estudios económicos indicarán las normas mínimas para la elección de materias primas. Una vez determinadas estas normas, pueden localizarse todas las posibles fuentes de materias primas y proseguir con un análisis más detallado de las mismas.

Se debe determinar la potencialidad de cada fuente de materia prima a la luz de las necesidades actuales y de las estimadas para el futuro. Se debe hacer un intento para estimar la duración de la fuente de materia prima en función de las necesidades futuras. Deben localizarse y evaluarse otras fuentes en el área que pudieran sustituir a la estudiada, o servir de alternativa. Puede determinarse el costo de la materia prima entregada en el sitio de la planta, para

todas aquellas fuentes que reúnan las especificaciones de calidad y cantidad que requiere el proceso.

Deben usarse las tarifas exactas de los fletes al determinar estos costos. Debido a la estructura tan compleja de las tarifas de fletes que existe en los Estados Unidos, no es posible usar algún número simple en dólares por milla (véase adelante). Una regla clásica establece que si la materia prima pierde mucho peso durante el proceso para obtener el producto final, es más barato construir la planta cerca de la fuente de materia prima. Sin embargo, como todas las reglas generales éstas tienen buen número de notables excepciones. Siempre debe hacerse un análisis del costo de la materia prima entregada, para cada localización de la planta que se considere.

Transporte

Como se dijo anteriormente, no puede aplicarse a las tarifas de fletes una regla simple en dólares por milla. Las tarifas de fletes de los ferrocarriles son en particular extremadamente complejas. Un ejemplo dado por Yaseen[15] ilustra de la manera más efectiva esta complejidad. Describe a un industrial que está estudiando el sitio para una nueva planta en el Ohio central, que tiene distribuidores en los alrededores y también en el área de Los Angeles. Un competidor importante está establecido en Cleveland, Ohio. Si se considera a Marysville como una posible ubicación, se encuentra que la tarifa de flete por cien libras a Los Angeles será de $5.56*. La tarifa desde Cleveland es la misma. Una ubicación en Peoria, Ohio, a sólo siete millas hacia el oeste de Marysville, tendrá una tarifa de $ 4.83 por cada cien libras, dándole una ventaja sobre su competidor de Cleveland.

No es posible presentar un estudio completo de tarifas de fletes en este capítulo. El ingeniero encargado de obtener la información relacionada con la localización de la planta, necesita solamente darse cuenta de que debe consultar expertos en transportes para determinar los fletes y la localización óptima con respecto al transporte. Los agentes de fletes y los expertos en el tráfico de ferrocarriles y en otros medios de transporte, tienen siempre datos al respecto. Además, el gerente de tráfico de la propia compañía puede ser una gran ayuda para obtener la información necesaria y auxiliar en su interpretación.

El efecto de los medios de transporte y de las tarifas en la localización de la planta puede ser un factor de control. Industrias como la del plástico, por ejemplo, que deben mandar embarques pequeños a varios compradores en un mínimo de tiempo, encuentran que la ubicación cerca de la mayoría de los compradores es obligatoria. Las tarifas para lotes-menores-que-carro completo- (LCL) son muy altas,

* A menos que se indique lo contrario, las cantidades monetarias que se citan en este libro están dadas en dólares de los EE.UU.

y, por tanto, la distancia a que va a embarcarse el material debe mantenerse en un mínimo.

Fletes de ferrocarril

Aunque el transporte en camiones ha aumentado en los últimos diez o quince años, puede asegurarse que pocas plantas de proceso podrían existir sin tener acceso cuando menos a un ferrocarril. Los ferrocarriles continúan transportando la mayor parte de los productos industriales. Si se quiere obtener un verdadero cuadro para comparar las ventajas relativas de las diversas localidades, es necesario intercambiar ideas con los agentes de tarifas de los ferrocarriles, concernientes a los fletes y a los métodos de manejo en las diferentes comunidades que se estudian.

El estudio de la estructura de las tarifas de fletes de los ferrocarriles revelará varios principios fundamentales. Debido al costo relativamente alto del transbordo de embarques de un ferrocarril a otro, es conveniente situar las plantas a lo largo de las rutas más importantes de los ferrocarriles, de manera que los embarques sigan las líneas principales entre el punto de embarque y el destino final. Donde sea posible, conviene que haya más de un ferrocarril sirviendo a una comunidad debido a que tal servicio proporciona mayor flexibilidad.

Muchas comunidades grandes que cuentan con el servicio de varios ferrocarriles, tienen compañías terminales o los llamados ferrocarriles de circunvalación, los cuales, frecuentemente, son propiedad también de los ferrocarriles de la región. Estas terminales proporcionan servicio de comunicación entre las vías de los ferrocarriles principales de la comunidad y todas las plantas. Este servicio es rápido y proporciona un transbordo más barato de línea a línea y finalmente a la planta. Por lo tanto, las zonas que tienen el servicio de compañías terminales son convenientes.

Si se prevén numerosos embarques que no llenen un vagón (LCL), la existencia de compañías que recolectan embarques pequeños hasta completar furgones es muy ventajosa. Estas compañías ofrecen servicio de casa en casa para embarques pequeños. Recogen un cierto número de embarques pequeños de una área que tengan el mismo destino y pueden así formar un embarque que complete un vagón para entregarlo en el ferrocarril. Algunos ferrocarriles proporcionan un servicio similar en comunidades grandes.

A primera vista puede parecer que una planta debe estar situada cerca de la fuente de las materias primas o cerca del mercado para sus productos. Sin embargo, si se considera solamente el transporte, la ubicación intermedia puede ser tan ventajosa como las anteriores. Los ferrocarriles ofrecen privilegios de fabricación en tránsito para ciertos productos. Este privilegio permite que el material sea enviado a la planta, procesado y después remitido a su destino final, esencial-

mente por el mismo precio que se hubiera cobrado por un viaje sin escalas. Conviene verificar si existen tales privilegios para los artículos que se van a producir. Muchas otras peculiaridades sobre las tarifas han aparecido a medida que los ferrocarriles se desarrollan y la competencia se vuelve más aguda.

Transporte en camión

Los movimientos interestatales de camiones, como en el caso del transporte interestatal por ferrocarril, están ahora regulados por la Comisión de Comercio Interestatal. Las líneas de camiones están clasificadas como de transportes regulares o eventuales, según que la línea ofrezca un servicio regular entre dos puntos u opere sobre la base de contratos en el momento conveniente para el remitente. Las líneas de camiones han podido competir vigorosamente con los ferrocarriles en embarques pequeños y, en particular, en pequeños acarreos. Debido a la ventaja competitiva en esta fase de los fletes, las líneas de camiones se han concentrado en el desarrollo de medios eficientes para manejar lotes menores que la carga de un camión. Como en el caso de fletes por ferrocarril, se debe evitar que haya un número excesivo de transbordos. La ubicación de la planta en la ruta de un transporte principal que proporciona conexiones directas a varios puntos de embarque, elimina la necesidad de hacer transbordos y reduce los costos.

Al considerar el transporte en camiones en una comunidad dada, deben consultarse las concesiones de cada una de las líneas que atraviesan el área para determinar si a la compañía de camiones se le permite dar servicio a esa comunidad en particular.

Transporte por barco

El transporte por barco es, y probablemente siempre será, el medio de transporte más barato, de manera especial para acarreos de grandes volúmenes a grandes distancias. Es una ventaja para una planta de proceso colindar con aguas navegables, aunque las operaciones iniciales no requieran embarques por agua. Muchas compañías han podido competir de manera efectiva en mercados distantes, aunque éstos estén abastecidos por plantas en su área. Un productor de amoniaco en California puede embarcar el amoniaco líquido en gabarras de transporte marítimo a la zona situada en el Pacífico noroeste y competir con plantas situadas en ese territorio. Un gran productor de cáusticos en la Costa del Golfo embarca el 73% de su producto por la vía marítima en barcos tanque hacia terminales en la costa del este, desde donde se envían más adelante por ferrocarril, o camiones, a los consumidores de dicha región. Este es otro ejemplo en el que el bajo costo de los fletes por barco permite al productor competir con los fabricantes que se encuentran en el área del mercado.

Además del transporte marítimo, los Estados Unidos están favorecidos por muchas millas de corrientes y canales navegables. Quizá el sistema de canales más espectacular sea el Canal intercostero que constituye rutas de embarque protegidas por el tráfico de barcos desde Brownsville, Texas, hasta New England. Los Grandes Lagos y grandes ríos tales como el Mississippi, Ohio, Hudson, Tennessee, significan miles de millas de vías navegables adicionales que pasan a través de centros de población de los Estados Unidos.

Muchas plantas de proceso han encontrado que es ventajoso operar sus propios barcos y lanchones aunque existan compañías de transportes marítimos. Para estimular el transporte acuático, el gobierno federal ha operado por algunos años una gran línea de barcos de carga llamada "La Línea Federal de Barcos de Carga".

Otros medios de transporte

Varía la importancia de los servicios que ofrecen las compañías de aviación, las compañías de express, correo y las líneas de tubería, según la planta de que se trate. Debido al incremento del tráfico aéreo y a la actividad de la industria, en la actualidad, es ventajoso estar convenientemente situado cerca de un aeropuerto, si no existe alguna razón especial, sí lo es para comodidad del personal de la compañía que efectúa viajes de negocios. Aunque pocas plantas de proceso requerirán continuos embarques aéreos, no es raro recurrir a un embarque aéreo de emergencia para el envío de refacciones para el equipo de la planta. Este es otro caso en que la localización conveniente de un aeropuerto resulta ventajosa.

El express aéreo y ferroviario, así como el servicio postal son necesarios para ciertas fases de la operación de cualquier planta industrial. La disponibilidad y calidad de tales servicios en una comunidad dada debe comprobarse por completo.

En cualquier discusión de transportes para plantas de proceso no se deben pasar por alto las líneas de tubería. La industria petrolera es la que más usa las líneas de tubería para transportar las materias primas y los productos. La creciente red de tuberías de gas natural ha influido en algunos casos en los que se usa gas natural en los procesos químicos. En lugar de ubicarse cerca de la fuente de abastecimiento de gas natural, algunas compañías han encontrado que es ventajoso situar sus plantas cerca de una línea de tubería y del mercado eventual. Tal decisión, sin embargo, debe estudiarse cuidadosamente, puesto que se puede confiar menos en el abastecimiento por tubería que en el abastecimiento subterráneo en, o cerca de la planta.

Agua para uso industrial

Las industrias de proceso están clasificadas como las mayores consumidoras de agua. Ninguna planta de proceso podría operar sin

agua para enfriamiento o para usarla directamente como materia prima en ciertas fases de un proceso. El abastecimiento de agua en una zona, por tanto, debe estudiarse antes de que esa zona pueda siquiera considerarse como un posible sitio. Debe buscarse el consejo de expertos en el tratamiento del agua, incluyendo geólogos e ingenieros químicos especializados en problemas de agua.

Antes del estudio, debe hacerse una estimación detallada de las necesidades de agua para el presente y para el futuro. Esta debe continuarse con un estudio cuidadoso del agua disponible en la región que se está estudiando. Si va a usarse agua de pozo es necesario hacer un estudio completo de la historia pasada del agua subterránea. Debido a su temperatura más baja, se prefiere el abastecimiento de agua subterránea si es adecuada.

Powell y Von Lossberg[9] han descrito un método para predecir la futura disponibilidad y la seguridad del abastecimiento de agua subterránea haciendo pruebas en los pozos existentes. Se miden los niveles del agua en los pozos en observación mientras se bombea de pozos activos cercanos. Se usa entonces la fórmula de Theis[9] para predecir el descenso del nivel al cabo de un largo periodo de bombeo.

El agua superficial de corrientes, o lagos, también requiere un estudio cuidadoso, puesto que a menudo se ve afectada severamente por las variaciones en las estaciones. Las corrientes de agua dulce que descargan en el mar pueden volverse saladas durante el tiempo de bajo nivel al invadir el mar el lecho del río. Bajo estas condiciones puede ser necesario que una planta instale grandes depósitos para almacenar agua dulce durante el periodo de corriente abundante y usarla cuando la corriente se vuelve salada.

Es necesario verificar la historia del flujo del río o del nivel del lago tantos años atrás como sea posible de modo que se pueda predecir la seguridad de un abastecimiento adecuado según los datos históricos. Las industrias que se cambian hacia zonas relativamente nuevas a menudo cometen el error de no considerar la posibilidad de que puedan seguir su ejemplo otras plantas. La cantidad del abastecimiento de agua debe no solamente ser la adecuada para las futuras necesidades de la planta propuesta, sino también la adecuada para abastecer las necesidades que se anticipan para otras industrias que tal vez se instalen en esa zona. También conviene considerar otras alternativas para fuentes de abastecimiento que puedan requerirse a medida que las fuentes de agua iniciales se vayan extinguiendo.

Además de la cantidad adecuada de agua disponible, debe estudiarse también su calidad. Exámenes químicos y bacteriológicos del agua indicarán la extensión del tratamiento requerido y ayudarán en la determinación del costo del agua para compararlo con el de otros sitios. Debe preverse la posibilidad de contaminación de la fuente del agua por otras industrias de la región. Esta contaminación

puede consistir solamente en elevar la temperatura del agua a tal grado que no se pueda utilizar como medio de enfriamiento.

El ingeniero químico está generalmente bien preparado para comparar los costos de distintos abastecimientos de agua, pero rara vez tiene los antecedentes necesarios para llegar a conclusiones adecuadas acerca de la magnitud y de la seguridad de un abastecimiento en particular. Tales estudios merecen la atención de un consultor competente en agua; entrenado en geología y meteorología.

Eliminación de desechos y disminución del ruido

El ingeniero estudiará la eliminación de desechos y la disminución del ruido, que son factores importantes tanto en las áreas poco pobladas como en las ciudades muy populosas, que tienen leyes especiales relacionadas con estos problemas. En pocos actos se exhibe tanto la falta de principios o de criterio, como al descargar los desechos a la atmósfera o en corrientes cercanas. Además de las consideraciones éticas o morales, ni siquiera es económico. Eventualmente la comunidad se levantará indignada e impondrá leyes que pueden ser tan onerosas que una operación lucrativa sería imposible. Le conviene al ingeniero, por tanto, estudiar la eliminación de desechos y los problemas de ruido y considerar los métodos y costos de un programa de control efectivo para cada región que se estudie.

Combustible y energía

Todas las plantas de proceso requieren vapor y energía eléctrica para su operación. La energía se compra a las compañías de servicios públicos locales, o se genera en algún lugar de la planta. Inclusive, si la planta de proceso genera la energía, deben hacerse arreglos con los servicios locales para obtener energía auxiliar en casos de emergencia. El vapor rara vez se compra ya que se genera en la planta para su uso en los procesos y como medio para impulsar bombas y compresoras.

Debe conocerse en forma detallada la cantidad de energía y vapor requeridos para la operación de la planta proyectada antes de proseguir el estudio. Debe analizarse cuidadosamente el costo de todos los combustibles disponibles en la zona. Las líneas de tubería de gas natural están poniendo en disponibilidad gas barato en muchas partes del país. Las tarifas industriales del gas natural parecen atractivas, pero deben examinarse cuidadosamente. Las industrias situadas lejos de los abastecimientos de gas natural serán las primeras en tener problemas si ocurre una interrupción en el servicio de las tuberías o cuando un invierno, por ser excesivamente frío, produzca una demanda extraordinaria de gas. Más aún, las tarifas baratas para las industrias en ciudades abastecidas por tuberías, a menudo sólo se aplican para las condiciones del verano cuando la demanda

es baja. En tales casos, se dispondrán como alternativas otras fuentes que se puedan utilizar en los meses de invierno.

Facilita mucho la evaluación de los costos de energía la pronta cooperación de las compañías de servicios públicos locales. La mayoría de estas organizaciones tienen personal que se especializa en energía industrial. El costo de producción de energía en la planta de proceso, que incluirá la depreciación de una planta de energía, es quizá el más difícil de determinar. Estará basado en la cantidad de combustible disponible en el área, en la experiencia de la compañía en otras operaciones de generación de energía y particularmente en la experiencia de otras plantas en la zona.

Conviene que una compañía progresista de servicios públicos sirva a la región que se estudia. Hasta las plantas de proceso que generan su propia energía necesitan comprar grandes cantidades de energía de tiempo en tiempo, debido a su rápida expansión. Sólo un sistema de servicios seguro y rápidamente creciente puede abastecer tales demandas.

Mano de obra

En el costo de cualquier artículo manufacturado, el de la mano de obra representa un alto porcentaje. Aunque los precios de la mano de obra están uniformándose más y más en la mayor parte del país, los factores tales como: la destreza, las relaciones laborales y el bienestar general de la fuerza laboral, afectan materialmente su producción y su eficiencia. Cada región que se estudie para la localización de la planta, debe investigarse para determinar la disponibilidad y la destreza del mercado laboral. La destreza no necesita igualarse exactamente a la requerida por la planta de proceso. Este hecho quedó claramente demostrado durante la influencia especuladora de la industria en la Costa del Golfo de los Estados Unidos. Se reclutaron trabajadores para operar una planta química entre antiguos operadores de una refinería y entre trabajadores de campos petroleros; ambos grupos tenían una experiencia que requería el mismo grado de responsabilidad que el de la planta química.

Los operarios para el mantenimiento forman una gran porción de la fuerza laboral de cualquier planta de proceso, y es necesario que la comunidad tenga disponible, cuando menos, un núcleo de tal fuerza, así como las facilidades de entrenamiento para preparar nuevos trabajadores.

Son importantes las tarifas de salarios que existen en una comunidad, pero sería un error craso planear como si las tarifas más bajas fueran a continuar indefinidamente. En los Estados Unidos existe la tendencia a eliminar gradualmente las diferencias en las tarifas de salarios entre las diferentes partes del país. Quizá el factor más importante es la estabilidad de esas tarifas en una comunidad.

Algunas comunidades se han hecho famosas por sus grandes fluctuaciones, lo que hace el planeamiento de una compañía extremadamente difícil.

Algo que también conviene estudiar es la historia de las inquietudes laborales en la región. Algunas ciudades, en los Estados Unidos, particularmente en las áreas industriales más antiguas, tienen una historia de inquietudes laborales que comenzó en los primeros días de la organización sindical y que, en apariencia, ha continuado periódicamente hasta la actualidad. Conversaciones con gerentes de otras plantas de la zona y con funcionarios de los sindicatos locales ayudarán a formarse una idea general. Un cambio de impresiones con los representantes sindicales locales servirá también para iniciar relaciones amigables. Pláticas con las gerencias de las plantas suministrarán datos sobre el importante problema de cambios de personal. Una fuerza laboral estable es valiosa para el éxito en la operación de la planta. Un "vistazo" a los hogares de los trabajadores en una comunidad y el conocimiento del porcentaje que tiene casas propias puede dar alguna clave sobre el estado de ánimo del grupo laboral.

Además de las leyes laborales federales que se aplican en los Estados Unidos, varios estados y comunidades han aprobado leyes que afectan las relaciones laborales, compensaciones a los trabajadores, edad mínima y otras disposiciones relacionadas con las cuestiones laborales. Estas leyes varían de región a región y es necesaria una asesoría legal competente para interpretarlas.

Clima

Deben reunirse datos climatológicos correspondientes a cierto número de años para cada comunidad en estudio. Debe darse atención muy particular a las condiciones climatológicas severas como huracanes, temblores e inundaciones. Estas catástrofes, que deben considerarse como probables, incrementan el costo de construcción. Un clima extremadamente frío, a menudo, estorba la operación de una planta de proceso y requiere características especiales en su construcción para proteger al equipo contra la congelación. Un clima en el que predomina el calor permite una construcción más barata, pero la opinión clásica es que reduce la eficiencia de la fuerza laboral. Esta conclusión debe verse con escepticismo cuando se comparan los registros de producción de plantas de proceso en clima caliente y húmedo, de Texas y de la Costa del Golfo de Louisiana, con los de otras partes del país.

Los costos para calentar o acondicionar el aire se pueden estimar usando los datos climatológicos de los años anteriores y las experiencias de las plantas construidas. El aire acondicionado en las regiones calientes del país no puede considerarse ya como un lujo.

En efecto, las compañías empeñadas en operar sus oficinas y cuartos de control sin aire acondicionado, encontrarán muy difícil obtener o retener empleados.

Factores de la comunidad

Uno de los aspectos más importantes en la localización de una planta, a menudo se pasa por alto o se juzga muy a la ligera. Este aspecto es el efecto del carácter y de los servicios, instalaciones, comodidades y atractivos que ofrece la comunidad que se estudia. Es muy difícil obtener información objetiva sobre una comunidad debido a que las fuentes de información usuales, tales como las Cámaras de Comercio o las Comisiones Industriales tienden a presentar opiniones algo parciales debidas al afecto natural hacia su propia ciudad.

El estudio de una comunidad debe empezar con un vistazo a su desarrollo histórico. Con este estudio puede conocerse el carácter de una ciudad, incluyendo su actitud general hacia el desarrollo industrial.

Suponiendo que el estudio histórico rinda un reporte satisfactorio, deben revisarse los factores antes mencionados que la comunidad ofrece. Un grupo de gente contenta requiere un cierto número mínimo de lugares de esparcimiento para una vida satisfactoria. Si éstos no existen, a menudo se convierte en una carga para la planta el subsidiarlos.

Los bancos deben ser dignos de confianza, contar con un personal competente y tener la capacidad suficiente para manejar las cuentas, tanto de la planta, como las de sus empleados. No puede sobreestimarse la importancia que tienen, especialmente para los miembros femeninos de las familias de los trabajadores, los centros comerciales.

Las ciudades más grandes ofrecen la ventaja de contar con almacenes de depósito, de manera que las refacciones para el equipo de la planta pueden obtenerse fácilmente.

Los hoteles adecuados y agradables son siempre apreciados, especialmente cuando el trabajo de los funcionarios de la planta consiste en atender a visitantes distinguidos. Cuando menos uno o más hospitales completamente acreditados por la Asociación Americana de Hospitales deben estar ubicados en la zona. En ciudades más grandes, el transporte se convierte en un problema. Muchos trabajadores prefieren usar los transportes públicos debido a la dificultad de estacionarse en ciertas zonas. Estos transportes públicos deben ser eficientes y económicos.

Los centros de cultura de la comunidad son importantes para el desarrollo sano. Iglesias, bibliotecas, escuelas, teatros, asociaciones de concertistas y otros grupos similares, si son activos y dinámicos, hacen mucho por una comunidad progresista. Los gerentes de plan-

tas que piensan en el futuro, se dan cuenta de que los jóvenes de una comunidad serán los empleados del mañana y que un sistema escolar bueno y oportunidades culturales adecuadas harán, en última instancia, mejores empleados. Debido a que las industrias de proceso dependen del potencial humano técnico, es conveniente que una universidad de primera clase esté situada en el estado bajo consideración. Sus departamentos de ingeniería y ciencias deben estar acreditados por los organismos apropiados (el Consejo de Ingeniería para el Desarrollo Profesional, la Sociedad Americana de Química, etc.).

El estudio de las tendencias de la población en una comunidad es a menudo revelador, puesto que indica su desarrollo y su carácter. Las estadísticas de población en grupos según las edades, auxilia a predecir la posible vitalidad de una región.

El problema de las diversiones merece especial. atención. Las diversiones incluirán, desde luego, los entretenimientos culturales que ya se han mencionado y, además, actividades al aire libre que van desde bailes en los clubes campestres hasta pequeñas reuniones en casa. La desventaja de comunidades extremadamente pequeñas y de los pueblos que surgen donde se establece una compañía, es que ésta debe subsidiar la construcción de parques, campos de golf y clubes. Además, los así llamados pueblos de compañía, están principalmente habitados por los empleados y sus familias. Mucha gente encuentra este ambiente estrecho, puesto que la mayoría de sus amigos son otros empleados y sus familias, y, muchas veces, las conversaciones en sus horas libres se limitan a hablar del trabajo. Esta generalización es, sin embargo, peligrosa, puesto que depende mucho de los individuos de que se trate. No obstante, puede decirse que se requiere gente con una preparación de cierto nivel para evitar estos problemas.

Las comunidades extremadamente pequeñas no ofrecen oportunidades para la diversión que la gente joven necesita y, a menudo, se crea cierto descontento. Cuando las plantas están situadas cerca de ciudades grandes se evitan estos problemas mientras que las plantas ubicadas en lugares remotos, los han superado estableciendo departamentos de diversión y clubes. Estos factores humanos no están muy definidos pero, sin embargo, son importantes y no deben pasarse por alto en cualquier análisis de sitios para plantas.

Deben evaluarse la eficiencia, el carácter y la historia del gobierno estatal y local. Las localidades que han sufrido largos años de gobierno corrompido e inepto presentan riesgos. Las leyes y reglamentos estatales y locales que afectarán las operaciones de la planta y las condiciones de vida, requieren el estudio de un abogado competente. Estas incluyen todas las referentes a impuestos, especialmente aquellas que se aplican directamente a la comunidad industrial. Los impuestos bajos no garantizan una situación favorable, a

menos que la comunidad esté ya bien desarrollada y no tenga grandes deudas. Es muy cierto que una comunidad que tenga sus sistemas de alcantarillado, de carreteras y otros servicios similares subdesarrollados, pronto deberá aumentar sus impuestos.

ELECCION FINAL DEL SITIO

Después de que ha sido elegida una zona, o región, para la ubicación de la planta, el siguiente trabajo es la elección de un sitio específico. Se puede obtener, sin visitar efectivamente las zonas una cantidad considerable de datos necesarios para la información discutida antes. La elección final del sitio, sin embargo, requiere un escrutinio cuidadoso por un cuerpo de expertos. Es preferible no publicar tales visitas, puesto que los valores de los terrenos invariablemente suben al rumorarse sobre la construcción de una nueva planta. La mejor manera de guardar este secreto es tratar con una sola firma de bienes raíces de confianza. Se deben evaluar la topografía y las condiciones del suelo de cada sitio. Los costos de cimentación aumentan mucho en sitios con suelos de baja capacidad de carga. Otro aspecto conveniente es un drenaje natural bueno y, si el sitio se encuentra cerca de una corriente u otra masa de agua, debe estudiarse cuidadosamente la historia de las inundaciones. Muchas veces, sitios aparentemente excelentes han sufrido inundaciones periódicas que jamás se hubieran podido conocer en una inspección del área durante condiciones normales. Además del consejo de expertos competentes en suelos y del de ingenieros constructores, sobre las posibilidades del sitio, funcionarios de las plantas vecinas pueden dar buenas indicaciones concernientes a la naturaleza de las diversas localidades en la zona.

COMO ENCONTRAR INFORMACION

El precedente resumen condensado de los factores que deben determinarse para un estudio de la ubicación de una planta, indica la necesidad de una vasta cantidad de información cuantitativa (estadística) y cualitativa. Debido al gran número de instituciones públicas y privadas que publican información útil de este tipo, puede hacerse una recolección muy deficiente de datos verdaderamente originales. Todas las fuentes de información impresa deben agotarse antes de hacer una investigación privada en una fase dada del estudio. Para ayudar en la búsqueda de información impresa, se da a continuación, en forma esquemática, una lista de fuentes que se sugieren, junto con la información que ofrecen. Los trabajos de Riggleman y Frisbee[10] y de Coman[3] ayudaron muchísimo en la preparación de este esquema.

I. Indices y Publicaciones auxiliares para la Investigación.

A. Publicaciones del gobierno de EE.UU.*

1. Hirshberg, H. S., y Melinat, C. H. *Subject Guide to United States Government Publications,* American Library Association, Chicago, Ill. (1947). Describe publicaciones del gobierno y da fuentes para un gran número de tópicos selectos.
2. Schmeckebeir, L. F., *Government Publications and Their Use,* The Brookings Institution, Washington, D. C. (1936). Otra guía descriptiva de las publicaciones del gobierno, aunque algo anticuada.
3. *Monthly Catalog of the United States Government Publications* — Indice principal de las publicaciones gubernamentales. El número de final de año contiene un índice anual de materias. Da una lista de prácticamente todas las publicaciones del congreso y departamentales y, comenzando en 1936 ha incluido muchas publicaciones fotograbadas (mimeografiadas, etc.) que se consideran de interés para el público. La mayoría de las grandes universidades y de las bibliotecas públicas son depositarias de las publicaciones del gobierno. Por consiguiente, mucho del material que aparece en la lista se encuentra disponible en bibliotecas cercanas.
4. *Document Catalog* (descontinuado en 1940) — Contiene una lista de todos los documentos presentados al congreso y también publicaciones de departamentos ejecutivos, agencias y oficinas del gobierno. Cada volumen cubre un periodo de dos años.
5. *Superintendent of Documents Price Lists* — No es una lista completa de todas las publicaciones, sino una lista de las populares en la actualidad. También está disponible una lista quincenal de publicaciones selectas.
6. *Numerical Lists and Schedules of Volumes of Reports and Documents of each Session of Congress* — Guía de la Literatura del Congreso.
7. *Congressional Directory* — Da una lista del personal oficial, responsabilidades y actividades de cada departamento, oficina y agencia del gobierno federal. La organización del gobierno cambia de año en año y el Directorio ayuda a encontrar la manera adecuada de hacer consultas por escrito.
8. *U. S. Government Manual* — Describe la organización y los deberes de las dependencias gubernamentales. Ayuda a localizar los servicios que antes daban dependencias abolidas.
9. *Official Register of the United States* (anual) — Lista de personas que ocupan posiciones administrativas, judiciales y legislativas en el Gobierno Federal.
10. *Departmental and Bureau Indices* — Un buen número de departamentos y oficinas del gobierno publican índices de sus propias publicaciones. Estas incluyen los siguientes compendios:

    a. *List of U. S Bureau of Mines Publications,* 1910-1949.
    b. *Index to Publications of the U. S. Dept. of Agriculture,* 1936-1940.
    c. *Catalog of U. S. Census Bureau Publications*, 1790-1945.
    d. *U. S. Dept. of Commerce Publications Catalog* (1952) — Listas mensuales de las publicaciones de éstas y otras dependencias están disponibles.

B. Publicaciones estatales

1. *U. S. Library of Congress Monthly Check-List of State Publications,* Division of Documents, Library of Congress, Washington, D. C. No da una lista de todas las publicaciones estatales.

* Todas las publicaciones del gobierno de E.U.A., que aparecen en la lista están disponibles en la Superintendencia de Documentos en Washington, D. C., a menos que se indique lo contrario.

2. Las listas de las publicaciones estatales se pueden obtener de los diferentes estados a través de la oficina de la Secretaría de Estado de cada entidad y de sus universidades. La mayoría de los estados publican manuales que describen su organización gubernamental y una lista actualizada de los jefes de departamentos y agencias.

C. Otros índices

1. Indices normales que le son familiares a quienes frecuentan bibliotecas son, desde luego, valiosos en cualquier búsqueda de información. Estos incluyen *Industrial Arts Index, Chemical Abstracts, Engineering Index,* etc.
2. Algunas organizaciones tales como la Engineering Societies' Library in New York suministran bibliografías gratuitas sobre tópicos selectos.
3. Coman, E. T. Jr., *Sources of Business Information,* Prentice-Hall, Inc., New York, N. Y. (1949).
4. *National Trade and Professional Associations* — Lista que publica periódicamente la Government Printing Office.

II. Fuentes de Información Específicas por Materias

A. Comercio en General e Información Financiera de la Industria

1. Moody's Investor Service, New York, N. Y.
   Industrial Securities
   Manuals of Security Rating
2. Standard & Poor's Corporation, New York, N. Y.
   Standard & Poor's Industry Surveys
3. Publicaciones Comerciales.
   Chemical Engineering
   Chemical & Engineering News
   Chemical Industries
   Petroleum Refiner
   Oil & Gas Journal
   Petroleum Engineering
   Oil, Paint & Drug Reporter
   Oild World
4. Asociaciones Comerciales y Profesionales.
   American Chemical Society
   American Institute of Chemical Engineers
   American Petroleum Institute
   Natural Gasoline Association of America
   National Petroleum Association
5. *World Almanac and Book of Facts, New York World-Telegram & Sun,* New York, N. Y. (anual).
6. State Almanacs — Publicado por algunos periódicos en el estado.
7. *Chemical Engineering Catalog,* Reinhold, New York, N. Y. (anual).
8. *The Refinery Catalog,* Gulf Publishing Company, Houston, Texas (anual).
9. *Thomas' Register of American Manufacturers,* Thomas Publishing Co., New York, N. Y. (anual).
10. *Survey of Current Business,* Supt. of Documents, Government Printing Office, Washington, D. C. (mensual).
11. *Statistical Abstract of the United States,* Government Printing Office, Washington, D. C. (anual). — Ayuda a localizar fuentes de la enorme cantidad de datos estadísticos disponibles. Auxiliar para encontrar publicaciones estadísticas y fuentes, tanto públicas como privadas.
12. U. S. Department of Commerce — Estadísticas de negocios, mapas y servicios de consulta.
13. Chamber of Commerce of the U. S., Washington, D. C. — Muchas publicaciones y servicios. Lista disponible.

*14. Local Chambers of Commerce and State Industrial Commissions.
15. Association of American Railroads, Public Relations Dept., Washington, D. C. — Lista de ferrocarriles que tienen un Departamento de Investigación Industrial que hace investigaciones del área. Otros servicios.
16. *Census of Manufacturers* and *Census of Business*, Bureau of Census, Washington, D. C. — Costo de materiales y valor, o productos que se dan en forma de ventas o trueque al menudeo en el último.
*17. Industrial Development Divisions de los ferrocarriles y compañías de servicios públicos.
18. Bureaus of Business Research de universidades de los estados y otras. Estas oficinas publican los resultados de investigaciones sobre negocios de muchas regiones en un estado y representan una excelente fuente de información.

B. Materias primas, agua, combustible y energía

1. *Minerals Yearbook*, U. S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines (anual).
2. Department of Interior, Bureau of Mines, Geological Survey — Muchas publicaciones sobre recursos naturales están disponibles en estos departamentos. El Geological Survey puede suministrar información sobre los recursos minerales y del agua; es una fuente de información sobre todos los mapas que el gobierno tiene disponibles. El Bureau of Mines puede proporcionar datos sobre combustibles y minerales.
3. Bureau of Plant Industry, Soils, and Agricultural Engineering, U. S. Dept. of Agriculture — Información sobre los suelos de todo el país.
4. Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture — Recursos forestales.
5. Federal Power Commission, Washington, D. C. — Datos sobre la tarifa de investigaciones sobre energía; directorio de servicios públicos; datos disponibles sobre gas natural.
6. Professional, Trade Publications, and Almanacs. (Véase A-3, 4 y 5.) El lector estará familiarizado con la literatura del campo de su propia técnica.
7. American Gas Association, New York, N. Y. — Tarifas de gas. Publica *Gas Facts*.
8. Chambers of Commerce, Industrial Commissions, Railroad and Utility Industrial Divisions, etc. (Véase A-13, 14 y 17.)
9. Los Departamentos de Ingeniería y Geología Económica de las universidades estatales, compilan y publican una cantidad considerable de datos útiles sobre los recursos de un estado.
10. *Petroleum Data Book*, Petroleum Engineering Publishing Company, Dallas, Texas.

C. Transporte

1. Association of American Railroads.
2. Local Railroad Representatives.
3. Compañías de transporte de carga y almacenes de depósito locales.
4. *Official Guide of Railway & Steam Navigation Lines*, National Railway Publishing Co., New York, N. Y.
5. *Handy Railway Atlas of the United States*, Rand McNally and Company, Chicago, Ill.
6. *Official Steamship and Airway Guide*, Transportation Guides, Inc., New York, N. Y.

---

* La mayoría de las organizaciones de este tipo proporcionan información estadística honesta y exacta. Su entusiasmo por el área en la cual están localizadas, puede, sin embargo, comprensiblemente, influir en las conclusiones basadas en estas estadísticas. Además de la información impresa, las cámaras de comercio y agencias industriales, suministran un grupo de expertos para ayudar a las compañías a obtener información.

7. Interstate Commerce Commission, Washington, D. C. —Estadísticas sobre ferrocarriles, camiones de carga y autobuses.
8. Civil Aeronautics Administration, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C. — Datos estadísticos sobre compañías aéreas disponibles previo pedido.
9. *American Aviation Directory,* Aviation Associates, Inc., Washington, D. C.
10. *Russel's Official National Motor Coach Guide,* Russel's Guides, Inc., Cedar Rapids, Iowa.
11. *Motor Carrier Directory* (camiones de carga), Motor Carrier Directory Co., Atlanta, Georgia.
12. American Trucking Association.
13. State Highway Departments — Mapas, reglamentos de carreteras.
14. *Maps of Principal Waterways of the U. S.,* Corps of Engineers, Dept. of Army, Washington, D. C. — Además, información disponible sobre puertos de entrada y puertos marítimos.

D. Mano de obra

1. Bureau of Labor Statistics, U. S. Dept. of Labor, Washington, D. C.
   a. Reporte mensual de empleo por estados.
   b. Indices del costo de vida.
   c. *Handbook of Labor Statistics.* Se publica irregularmente desde 1926 — Salarios, costo de vida, etc.
   d. *Monthly Labor Review.* Investigaciones sobre salarios, datos estadísticos, bibliografía sobre literatura laboral.
2. Bureau of Labor Standards, U. S. Dept. of Labor, Washington, D. C. — Compendios de leyes laborales; contestan preguntas que conciernen a la situación laboral local.
3. *The Conference Board Management Record,* National Industrial Conference Board, New York, N. Y. (mensual). Discute tendencias laborales y presenta estadísticas.
4. Labor Union Publications.
   a. *Economic Outlook* — CIO, Dept. of Education and Research, Washington, D. C.
   b. *Labor's Monthly Survey,* AFL, Washington, D. C.
5. *Handbook of Labor Unions,* American Council on Public Affairs, Washington, D. C.
6. *Who's Who in Labor,* Dryden Press, New York, N. Y.
7. Prentice-Hall Labor Publications, Prentice-Hall, New York, N. Y.
   a. *Labor Report.* Reporte semanal de relaciones laborales.
   b. *Labor Guide.* Interpreta las leyes existentes.
   c. *Labor Service.* Suplementos semanales, textos completos o resumidos de todas las nuevas leyes laborales.
8. Bureau of National Affairs, Washington, D. C., y la Commerce Clearing House, Chicago, Ill. Publica una considerable información laboral.
9. Representantes de los sindicatos locales y abogados laborales.
10. Oficinas estatales de empleo — Las oficinas locales pueden suministrar información sobre las condiciones de empleo en el área.
11. *Index to Labor Articles,* Rand School of Social Science, New York, N. Y. (mensual).

E. Clima

1. Weather Bureau, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C. — Lista de precios de las publicaciones disponibles.
2. Las Oficinas Climatológicas Locales auxilian también al suministrar datos sobre el clima en los años anteriores.

F. Factores de la Comunidad

1. Bureau of Census.
   a. Resúmenes de las leyes estatales relacionadas con impuestos (Gov. Div.).
   b. Finanzas y empleo en la ciudad (Gov. Div.).
   c. Censos de población.
2. *Statistics of Income,* Bureau of Internal Revenue, U. S. Treasury Dept., Washington, D. C.
3. *Municipal Yearbook,* International City Managers Association, Chicago, Ill. — Lista de funcionarios y forma del gobierno de la ciudad.
4. *Management Almanac,* National Industrial Conferences Board, New York, N. Y. — Da los índices de los precios de consumo en 60 ciudades.

*5. *Automobile Facts & Figures,* Automobile Manufacturers' Association, Detroit, Mich. — Proporciona datos de registro.
*6. American Transit Assoc., New York, N. Y. — Escriba pidiendo información sobre los sistemas de transporte locales.
*7. American Taxicab Association, Chicago, Ill. — Escriba pidiendo datos sobre estadísticas de taxis.
*8. American Telephone & Telegraph Co., New York, N. Y. — Póngase en contacto para pedir datos estadísticos sobre teléfonos.
*9. U. S. Post Office Dept., Washington, D. C. — Póngase en contacto para saber los ingresos de cada oficina de correo en particular.

10. Department of Commerce — Datos estadísticos sobre toda clase de operaciones comerciales.
11. Banker's Directories.
    a. Rand-McNally, Chicago, Ill.
    b. R. L. Polk Company, Nashville, Tenn.
12. State Banking Commissions.
13. *Moody's Bank and Financial Manual,* Moody's Investor Service, New York, N. Y.
14. Servicios Estadísticos
    a. Dun & Bradstreet
    b. Standard & Poor's
15. Federal Reserve Bank.
16. *Federal Reserve Bulletin,* Board of Governors Federal Reserve System, Washington, D. C. (periódicamente) — Proporciona datos sobre las ventas de los almacenes y el crédito de los consumidores.
17. Bancos locales.
18. Cámara de Comercio: concejos de desarrollo industrial de la ciudad, condado o estado; universidades estatales.
19. *Biennial Survey of Education,* Federal Security Agency, Washington, D. C. — Estadísticas sobre educación superior y escuelas de la ciudad.
20. Asociaciones de Padres y Maestros Locales.
21. *Annual Directory of Hospitals,* American Hospital Association, Chicago, Ill.
22. *American Medical Directory* (anual), American Medical Association Chicago, Ill. — Lista de médicos.
23. Departamentos de salud estatales y municipales.
24. National Office of Vital Statistics, U. S. Dept. of Public Health, Was' ington, D. C. — Nacimientos y defunciones en las ciudades.
25. *Official Hotel Redbook & Directory,* American Hotel Association Dir Corp., New York, N. Y.
26. *Directory of Newspapers & Periodicals,* N. W. Ayer & Sons, Philad
27. *American Guide Series,* Work Projects Administration — Se que son una guía sobre los estados y ciudades en los EE. U

* Valiosos para comparar comunidades.

rante los días de la Administración del Trabajo para el Progreso y publicado en 1940. Aunque anticuadas, gran parte de la historia y de la información descriptiva general, son valiosas para ayudar a entender a una región. Hastings House, New York (1940).

La lista anterior no es completa. Se puso mucho énfasis en las fuentes de datos que no son técnicos puesto que se supone que los ingenieros tendrán un conocimiento, derivado de su trabajo, de las fuentes de literatura técnica y científica.

La información concreta disponible en las divisiones industriales de las cámaras de comercio, las compañías de servicios públicos y los ferrocarriles, merecen especial atención aquí. Aunque, como ya se ha mencionado, la interpretación hecha por estas organizaciones estará probablemente conteniendo el mismo entusiasmo hacia una área como el que tenga cualquier persona de la localidad, generalmente se puede confiar en los datos concretos. Están arreglados de manera muy útil y representan el medio más rápido para obtener datos compilados especialmente para una investigación preliminar. Ciertamente, para investigaciones detalladas se deben obtener factores adicionales que puedan haber sido omitidos y deben verificarse todos los demás datos.

Como ejemplo del tipo de información que se puede obtener en una cámara de comercio, es interesante darle un vistazo al folleto publicado por la Cámara de Comercio de Houston,[6] una área industrial en rápido crecimiento particularmente en industrias de proceso. En resumen, la información recopilada incluye lo siguiente:

1. Mercado—Poder de compra del área circunvecina por condados.
2. Transportes — descripción y nombres de todos los tipos.
3. Materias Primas — información cualitativa.
4. Combustibles, Agua y Energía — tarifas y dirección de los funcionarios de los servicios.
5 Mano de obra — tarifas de salarios típicos; índice de los precios de consumo.
6. Impuestos — tarifas. Dirección de los funcionarios de la ciudad y del estado a los que se debe consultar para informaciones adicionales — Explicación de la estructura de los impuestos.
7. Clima — cartas.
8. Industrias en la zona — petróleo y gas, químicas y metalúrgicas — Descripción de las instalaciones existentes, producción y lista de todas las plantas en la Costa del Golfo, con los nombres de los gerentes generales, lista de los productos y cantidades disponibles.
...tadísticas Varias sobre un Periodo de Años.

E. Clim...

...blación.
1. Weathe... ...as al menudeo.
de precios ...cciones nuevas.
2. Las Oficina...
tos sobre el cl... ...de banco.

e. Empleo.
f. Ingresos de las Oficinas de Correos.
g. Resumen Estadístico de la Cámara de Comercio (publicado mensualmente) — incluye estadísticas sobre el tonelaje del Puerto de Houston, ventas de los almacenes, teléfonos en servicio y otros veintidós puntos que indican la vitalidad de la ciudad.

Cuando uno se da cuenta de que toda esta provechosa información está disponible en una organización, sin costo, el valor de los departamentos públicos y privados de desarrollo industrial, se hace más notorio.

REFERENCIAS

1. Aires, R. S., y D. F. Othmer, *Chem. Eng. Progr.*, 45, 285 (1949).
2. Atkins, R. M., *Harvard Business Review*, 30, Núm. 6, 113-121 (1952).
3. Coman, E. T., *Sources of Business Information*, Prentice-Hall, Inc., New York, 1949.
4. Faith, W. L., *Chem. Eng. Progr.*, 45, 304 (1949)
5. Hoover, E. M., *Location of Economic Activity*, 1a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1948.
6. *Houston*, Houston Chamber of Commerce Brochure, Houston, Texas, 1952.
7. Hoyer, C. O., *Chem. Eng. Progr.*, 45, 314 (1949).
8. Perry, John H., *Chemical Engineer's Handbook*, Sec. 26, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
9. Powell, S. T., y L. G. Von Lossberg, *Chem. Eng. Progr.*, 45, 289 (1949).
10. Riggleman, J. R., e I. N. Frisbee, *Business Statistics*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1951.
11. Sittenfield, M., *Chem. Eng. Progr.*, 45, 316 (1949).
12. Sommers, H. A., *Chem. Eng. Progr.*, 45, 301 (1949).
13. Weber, A., *Über den Standort der Industrien*, Tübingen (1909). Traducido por C. J. Friedrich, University of Chicago Press, Chicago, 1928.
14. *When Planning Plant Expansion*, Brochure of the Walter Kidde Constructors. Inc., New York.
15. Yaseen, L. C., *Plant Location*, Business Reports, Inc., New York, 1952.

CAPITULO 3

DATOS PRELIMINARES PARA LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCION

Después que se ha elegido un sitio para la construcción de una planta de proceso, y antes que el proyecto pueda empezar, deberá acumularse una gran cantidad de datos. Los ingenieros, los agentes de compras y los supervisores de construcción, deben tener datos detallados del lugar donde va a quedar la planta y de sus alrededores.

Varios técnicos experimentados con conocimientos de ingeniería y construcción pueden obtener los datos preliminares necesarios en una visita al lugar de la construcción. Entre los datos que se reúnan deberán estar los de ingeniería para el proyecto, los de los sistemas de abastecimiento que se usen en la región y los necesarios para planear la construcción. Estos datos preliminares, más los necesarios para los procesos, fijan las bases para el proyecto y construcción de la planta.

DATOS PRELIMINARES TIPICOS

A continuación se describen los datos preliminares que deberá obtener el ingeniero en su visita de inspección al lugar de la obra.

DATOS DE INGENIERIA

Los datos de ingeniería esenciales para una planta de proceso que se deben obtener en la inspección incluyen:

Datos climatológicos

Para los proyectos domésticos en los Estados Unidos, puede obtenerse la información sobre el clima en dependencias oficiales como el U. S. Weather Bureau, el U. S. Department of Agriculture, y el U. S. Coast and Geodetic Survey. La American Society of Heating and Ventilating Engineers también ha recopilado una gran cantidad de datos climatológicos, que pueden ser útiles para el trabajo preliminar

DIRECCIÓN DE LOS VIENTOS DOMINANTES

Su conocimiento resulta útil para los estudios preliminares de la distribución de la planta. Como ilustración, supóngase que la planta está localizada en una zona donde la dirección dominante de los vientos es el sudeste. No sería conveniente localizar un proceso que descargue, con frecuencia, humos nocivos en el lado sudeste de la planta, donde el viento los arrojaría sobre ella. Supongamos de nuevo que en el proceso se descargan especialmente vapores volátiles e inflamables más pesados que el aire. No sería razonable localizar un calentador de hogar abierto en el trayecto que los humos seguirían de ordinario. Por tanto, debe tomarse en cuenta la dirección general del viento al localizar cualquier proceso que sea extraordinariamente peligroso o inflamable. Debe estudiarse también el efecto de la dirección del viento sobre las zonas de almacenamiento de productos.

VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO Y FRECUENCIA DE HURACANES Y CICLONES

Se usan para fijar las cargas de proyecto adecuadas (kilogramos por metro cuadrado) para las estructuras y los equipos o los edificios expuestos al viento. Por ejemplo, en algunas zonas costeras del Golfo (de Estados Unidos), se usan 195 kg por m^2 a causa de los huracanes. El valor final tiene una influencia considerable en el proyecto estructural y en el de la cimentación.

TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA Y MÍNIMA

En el proyecto de los procesos se usa en la elección de aislamientos y para elegir el tipo de edificios que, en la planta, protejan mejor al equipo de proceso; en el proyecto de edificios en lo que concierne a la comodidad del personal y para seleccionar los sistemas de mantenimiento. Las fluctuaciones de la temperatura atmosférica influyen también en el proyecto del sistema de enfriamiento para el agua y en la selección del equipo. Debe estudiarse las variaciones de la temperatura atmosférica durante un periodo de dos años, o mayor, para conocer mejor los valores promedios.

Humedad relativa (fluctuación diaria, mensual y promedio estacional)

Estos datos son indispensables para el proyecto de las torres de enfriamiento, secadores para el aire utilizado en los procesos, y para determinar las necesidades de comodidad para el personal en los edificios.

Precipitación pluvial (máxima, anual y promedio estacional)

Estos datos se utilizan para el proyecto del drenaje de la planta, en el proyecto de los edificios y posiblemente en el proyecto de los procesos.

Cantidad de nieve

Se necesita para el proyecto estructural, para estudiar el sistema de mantenimiento y el proyecto de los edificios.

Profundidad de congelación

Se utiliza para fijar la profundidad mínima de la cimentación y para programar el vaciado y curado del concreto cuando las temperaturas son inferiores a cero.

Datos sobre inundaciones locales o mareas

Utiles cuando la planta está ubicada cerca de una corriente importante expuesta a desbordamientos, o en una zona costera que pueda sufrir inundaciones.

Las condiciones climatológicas también afectan las operaciones de construcción, cuando el frío, el calor o las precipitaciones pluviales, son extremas; pueden influir en el programa de construcción y reducir la eficiencia del personal. Las temperaturas extremadamente bajas afectan las operaciones de construcción, especialmente las excavaciones y los trabajos de concreto, que deben suspenderse o tomar precauciones extraordinarias mientras el clima sea muy frío.

Terreno para la planta

a. Debe sondearse el suelo para la cimentación o estudiarse sus características de carga.

b. Deben prepararse planos topográficos que muestren las elevaciones del terreno, pues son útiles para proyectar el drenaje y el sistema de caminos de la planta.

c. Son necesarias la pendiente general, o las características del lugar, para estimar el costo de la nivelación preliminar del terreno; al mismo tiempo indican el tipo de equipo de construcción que debe emplearse para nivelar.

Necesidades y abastecimiento de agua

Deben obtenerse fuentes de agua para los siguientes usos:

a. Para uso industrial (agua usada en los procesos).
b. Para el sistema de enfriamiento.
c. Para beber (ésta debe ser agua potable).
d. Para el servicio (que se usa en la limpieza general y varios servicios).
e. Para la generación de vapor (agua tratada para calderas).
f. Para apagar incendios.
g. Para la construcción (la cantidad de agua para la construcción depende del tipo de proyecto, del número de empleados que haya en la construcción y del tiempo que dure).

El agua para enfriamiento en los procesos, para uso sanitario y generación de vapor, debe ser químicamente pura o tratada según lo requiera el proceso. Las fuentes de abastecimiento de agua pueden ser corrientes u otras fuentes naturales, siempre que la turbiedad y la cantidad de sedimentos no sean excesivas. A menudo se usa para enfriar agua salobre o salada, pero es necesario hacer una elección cuidadosa de los materiales de construcción para prevenir la corrosión o los sedimentos.

Las fuentes de agua disponibles deben estudiarse y analizarse para decidir el grado y tipo de tratamiento. El agua que se tome de corrientes o fuentes superficiales necesitará cierto tipo de filtrado para eliminar materias extrañas. La cantidad de agua que se vaya a usar determinará el tipo y la elección de este equipo.

Los pozos de agua constituyen, con frecuencia, la fuente de abastecimiento en muchas zonas. Pueden obtenerse, algunas veces, datos sobre una zona en particular, de firmas especializadas en instalaciones de pozos de agua. Se requerirá cierta cantidad de agua potable durante la construcción, para lo cual pueden resultar satisfactorios pequeños pozos temporales excavados más abajo del nivel freático. Dede hacerse un examen bacteriológico de todas las aguas naturales para asegurarse de que es agua para beber. El agua que se use para el concreto debe analizarse químicamente. El agua natural que no sea satisfactoria puede clorarse durante las operaciones de construcción para reducirle el número de bacterias, o puede transportarse en pipas al sitio de la planta, el agua suficiente para beber.

Energía eléctrica y abastecimiento de combustibles

Energía eléctrica

Cuando se va a comprar la energía eléctrica, debe localizarse la posición de las líneas de trasmisión y la de la subestación de la planta. Deben determinarse al principio los voltajes primarios para calcular

y obtener de inmediato, el transformador principal de la planta y dispositivos de distribución. Debe determinarse con la inspección preliminar la dirección en la que se instalarán las líneas; si se conducirá la energía desde el límite de propiedad hasta la subestación por líneas aéreas o subterráneas; si se instalará un solo sistema alimentador, o dos, o más. Usualmente será necesario un solo sistema alimentador; sin embargo, en algunas zonas sujetas a grandes perturbaciones eléctricas en la atmósfera, la frecuencia con que falla la energía es un problema serio. El proveedor de energía debe estar capacitado para reducir la frecuencia o probabilidad de falla, agregando una o más líneas alimentadoras adicionales que suministren energía de un lugar diferente. Puede conocerse la historia de las fallas en los registros del abastecedor o de otros usuarios locales.

También debe darse al abastecedor, tan rápidamente como sea posible, la fecha en que la planta iniciará sus operaciones, o en la que necesitará la energía. Si debe suministrar energía temporalmente para la construcción, se harán los arreglos necesarios para la instalación desde el principio. Cuando el servicio eléctrico sea deficiente y los registros muestren frecuentes fallas de la energía, deberán tomarse las medidas necesarias cuando algunos de los procesos se convierten en un peligro cuando falla la energía. En ciertos procesos, muchos motores principales deberán estar provistos de máquinas de vapor de repuesto por razones de seguridad. En una instalación grande la duplicación de máquinas puede ser costosa.

Los pequeños generadores de vapor del tipo compacto son, generalmente, más económicos que una planta generadora central y un sistema de distribución. En casi todas las zonas industriales de los Estados Unidos son más económicas las operaciones con energía eléctrica comprada que con energía generada en la planta. Deberán analizarse cuidadosamente estos aspectos lo más pronto que sea posible, ya que influirán mucho en el proyecto inicial y en los costos de proyecto, así como en la economía de la operación.

Elección de combustible

La elección del tipo de combustible depende de su potencia calorífica, de su precio de venta, y está estrechamente relacionada con la economía en la energía comprada. Algunas de las clases son: (1) gas natural; (2) aceites combustibles y gases licuados del petróleo; (3) carbón de piedra u otros combustibles sólidos; (4) residuos de la planta.

El gas natural se usa a menudo como materia prima en algunos procesos. Cuando en los procesos es usado como materia prima, también se utiliza como combustible en la planta. Algunos de los usos del gas son: como combustible para motores principales, como los de combustión interna o turbinas que mueven los grandes compresores; como combustible para generadores de vapor; como combus-

tible para los motores de los generadores de corriente eléctrica y para la fabricación de gases inertes para lavados y cubiertas de gas. Cuando se compra gas, es importante obtener los datos de la presión con los que va a suministrarse y analizarlo, así como una garantía de su composición o de los límites de su variabilidad. El gas natural es húmedo en ciertas zonas, o arrastra algo de agua condensada. En tal caso, deberá ponerse una trampa cerca de la entrada a la propiedad. En el contrato de abastecimiento debe decirse y especificarse claramente qué parte suministrará la trampa y sobre quién recaerá la responsabilidad del drenaje de la misma; es decir, si sobre el abastecedor o sobre el comprador. Mientras que algunos materiales líquidos se evaporan inmediatamente después de descargarlos, otros componentes pueden permanecer en estado líquido constituyendo un peligro. En algunas zonas industriales congestionadas el drenaje del agua condensada que lleva el gas natural, puede convertirse en un problema serio. A menos que se puedan utilizar estos líquidos, es mejor insistir en que el gas sea seco, suministrado a una presión determinada en el medidor del usuario.

El comprador debe también asegurarse del lugar preciso de la entrada a la propiedad de la tubería de gas natural y decidir cuál de las partes suministrará el medidor, el dispositivo primario, el cuarto del medidor, el equipo de válvulas y los accesorios para la tubería. Las sugerencias anteriores se refieren a servicios de abastecimiento del orden de los millones de metros cúbicos. No son de importancia para instalaciones pequeñas, con conexiones quizá de tubo de 3″ o menos. Sin embargo, deberá dejarse claramente establecido qué parte suministra e instala el equipo.

Cuando se redacta el contrato final con el abastecedor, debe prepararse un plano en el que se localice el punto de conexión con la tubería del propietario, que muestre el tipo de unión, de patín, con válvula, junta, etc., a la que se conectará la tubería de la planta. Estos datos los debe dar el abastecedor al comprador.

El gas natural que se suministra por tuberías ordinariamente no requiere tanques reguladores de presión ni de almacenamiento, puesto que el sistema debe tener la capacidad requerida. Para el sistema de combustible de la planta son innecesarias las presiones superiores a 2.1 o 2.8 kg/cm². En general, las presiones en las tuberías de abastecimiento son mucho mayores. Ordinariamente, el problema consiste en reducir las presiones de las tuberías a valores adecuados para los servicios de la planta. Por esta razón, debe discutirse el tema de la presión de abastecimiento tan pronto como sea posible. Si el gas se va a usar principalmente como combustible, se considera que es suficiente una presión relativa entre 3.5 y 5.3 kg/cm² para afrontar los incrementos rápidos en el consumo, con la presión adecuada para obtener un control y capacidad adecuada en el sistema de combustible de la planta. Las presiones relativas en los puntos en

que se consume el gas fluctúan entre 1.4 y 2.1 kg/cm², y son menores en los cabezales de los quemadores.

Los aceites combustibles se entregan generalmente en carros-tanque o en camiones-tanque (pipas). La planta debe contar con las instalaciones necesarias para el almacenamiento del combustible líquido. Usualmente se utiliza calor para descargarlos. Este tema se discute con mayor amplitud en el Cap. 21. En la investigación preliminar debe pensarse en la localización correcta del punto de descarga del ferrocarril, o camión, para que los estudios iniciales de la distribución de la planta incluyan estas instalaciones.

Los gases licuados del petróleo se están convirtiendo en una importante rama de combustibles para calefacción doméstica en algunas zonas; sin embargo, su uso como combustible industrial es todavía limitado. Si la planta es pequeña, puede usarse ventajosamente este tipo de combustible para la calefacción de edificios aislados.

El carbón de piedra no se usa ordinariamente como combustible en las plantas de proceso; sin embargo, puede usarse el carbón de piedra como combustible para generar energía, si la obra está localizada en una región productora de este combustible, o si otros no resultan tan económicos. Será necesario hacer las instalaciones pertinentes para su descarga, almacenamiento y manejo. Hay numerosos combustibles sólidos además del carbón de piedra, pero su uso requeriría instalaciones semejantes a las que éste requiere.

Los residuos de la planta son a menudo una fuente importante de combustibles. Su utilización, por supuesto, depende del proceso Si los residuos de la planta pueden quemarse como combustible, puede simplificarse el problema de su eliminación. Los residuos que se usan intermitentemente como combustible, pueden producir un problema de almacenamiento.

Transporte y Almacenamiento de productos y materias primas

Los datos preliminares respecto al terreno de la planta pueden tener un efecto importante en la posición de las instalaciones, como en los puntos de carga y descarga de los ferrocarriles y para empaque y almacenamiento. Algunas plantas ubicadas en sitios en pendiente disponen los almacenes para los líquidos de manera que toda la carga se haga por gravedad. La localización de los puntos de almacenamiento de productos peligrosos debe estudiarse cuidadosamente pues para satisfacer las normas de seguridad puede ser necesario adquirir terrenos adicionales.

Es muy importante determinar el transporte necesario dentro de la planta y las necesidades de almacenamiento, a causa del efecto que producen en la cantidad de energía que necesita la planta.

Algunas veces las materias primas entran a la planta y los productos salen de ésta por tuberías. Siempre que una tubería entre o salga de la planta, deben determinarse los puntos exactos tan pronto

como sea posible, para evitar su interferencia a otras instalaciones de la planta.

Datos sobre abastecimientos

Los datos preliminares que afectan el abastecimiento son:

1. La fecha más cercana en que pueden recibirse los materiales en la obra.
2. Los materiales básicos que se puedan conseguir en la región.
3. Ferrocarriles utilizables y lugar de descarga más cercano, que conecta con líneas de camiones.
4. Localización de las carreteras principales.
5. Localización de la ciudad más cercana.
6. Tipos de equipo industrial que puede usarse en el montaje de la planta disponibles en las proximidades.
7. Talleres industriales situados en las proximidades, dispuestos para la reparación, mantenimiento o suministro de refacciones para el equipo de construcción.
8. Espacio y superficie de almacenamiento para el equipo de la planta y materiales de construcción.

Como se estableció en el Cap. 9, el abastecimiento está íntimamente relacionado con la programación y planeación del proyecto (Cap. 7). Lo más importante para el personal de abastecimiento será el equipo de la planta y el transporte del material para construcción. Afectan el abastecimiento los métodos de transporte, el tiempo necesario, las tarifas de los fletes, los materiales para construcción, el almacenamiento (en el lugar de la obra), la fabricación en el campo de ciertas partes del equipo y los datos sobre las entregas de todos los abastecimientos. El transporte y el almacenamiento en el sitio de la obra, afectan mucho la planeación y programación del abastecimiento preliminar.

El punto vital del abastecimiento es siempre la entrega o las fechas de entrega. Un proyecto en un lugar lejano en el que el tiempo necesario para el transporte sea de un mes, requerirá que todo el programa incluya ese tiempo. Deberá investigarse la disponibilidad de materiales comunes en la zona de la construcción lo mismo que los precios. Las diferencias de precios pueden justificar la compra local de un gran porcentaje de materiales y justificar una adquisición local. Algunos materiales como el concreto preparado, o los materiales para fabricarlo, siempre se compran localmente en los proyectos nacionales. Como parte de los datos que se obtienen en la investigación preliminar, deberán incluirse los resultados sobre fuentes de abastecimiento y precios de materiales. Los impuestos locales sobre ventas pueden afectar los precios, por lo que deben incluirse en la investigación.

Datos para la construcción

Las condiciones locales afectan todas las fases de la construcción, puesto que la organización de la construcción debe convertirse en parte del medio ambiente durante todo el periodo de montaje. Los datos siguientes deben obtenerse tan pronto como sea posible.

Mano de obra

a. Salarios de la región, contratos de trabajo con las fechas de vigencia y terminación, y la disponibilidad de artesanos locales competentes.

b. Nombres y direcciones de representantes de sindicatos, direcciones de todos los agentes comerciales o de sus sindicatos regionales.

c. Relación de obras proyectadas en la región y épocas que necesitarán mayor número de empleados.

d. Permisos sindicales — si es que se desea traer personal foráneo a la región, estos permisos para que trabaje deben obtenerse mediante convenio. (Estos permisos nunca se obtienen en forma completa, pero debe intentarse.)

e. Existencia de alojamiento para el personal, lo que puede resolverse si la obra queda cerca de una ciudad.

f. Disponibilidad de comedores y centros de recreo.

g. Servicios médicos y condiciones climatológicas especiales que puedan afectar al personal (muy importante en trabajos proyectados en el extranjero).

h. Costumbres de la región; puede suceder que estos datos nunca se conozcan, porque las costumbres laborales varían mucho. Véase el Cap. 25.

i. Transporte que necesita determinado personal; algunos operarios exigen que se les proporcione transporte, o que se les considere el tiempo desde que salen de su casa.

j. Estacionamiento para el personal de construcción, si el montaje se va a efectuar dentro de una planta en operación y el personal de construcción debe dejar su propio transporte en la puerta de la planta; algunas veces es necesario llegar a un acuerdo con el propietario sobre lugares para estacionamiento. Este asunto puede resolverse algunas veces disponiendo un lugar para el estacionamiento del personal de construcción dentro de la planta. Estos asuntos deberán aclararse perfectamente antes de comenzar el trabajo.

k. Instalaciones sanitarias y para cambio de ropa para el personal de construcción. Se está convirtiendo en costumbre que el personal disponga de un lugar determinado para cambiar de ropa, para lo que puede ser necesaria la construcción de edificios provisionales. Por supuesto, los servicios sanitarios deberán quedar terminados al principio de la obra. Si existen en la planta, el propietario deberá permitir que los utilicen.

l. Identificación para el personal de construcción; en algunas obras, se requieren fotografías y huellas digitales. Generalmente se usan distintivos. Cuando el trabajo se hace en una planta, deben conocerse todos los requisitos que ha establecido el propietario.

m. Localización del material de construcción, del que se va a usar en la planta y del área de almacenamiento del equipo, que con frecuencia afectan problemas de jurisdicción en la descarga, transporte y manejo de materiales. Por tanto, la selección del lugar de almacenamiento, aparte de su mejor ubicación para que el manejo sea económico, deberán también tomarse en cuenta los requisitos laborales.

n. Sindicatos de trabajadores para la operación de las plantas. Cuando el constructor emplea personal sindicalizado, los agentes comerciales deberán ponerse en contacto para prevenir posibles problemas.

Interferencias en la construcción

Estos asuntos no son generalmente tan importantes cuando se hace una obra completa, como cuando se trabaja dentro de una planta en operación.

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS O SUBTERRÁNEAS. Deben determinarse la posición, altura sobre el terreno, profundidad bajo tierra, fuente de energía, superficie servida, propietario u operador, interruptor más cercano para desconectar. ¿Si se usa grúa, libra los cables? Posición de los anclajes.

TUBERÍAS ELEVADAS O SUBTERRÁNEAS Y ALBAÑALES. Determínese su posición, tamaño, etc. Las tuberías instaladas en la planta en operación son con frecuencia, la fuente de muchos costos extras para el constructor de la nueva obra. En muchas plantas no existen registros exactos ni seguros de la posición de las instalaciones subterráneas. Deberá establecerse de quién es la responsabilidad cuando se destruyan.

PELIGROS DE LA PLANTA. Muchas plantas en operación donde se trabaja, pueden despedir vapores o humos tóxicos, o peligrosos. En algunos casos debe suspenderse el trabajo hasta que pase el peligro. Deberá establecerse quién corre con los costos de la mano de obra improductiva durante estos periodos. A menudo, existen grandes restricciones para soldar o cortar con soplete de llama abierta en las plantas. Debe averiguarse si se aplican. En muchas plantas en las que se procesan hidrocarburos y en otras donde se tratan materiales peligrosos, todos los cerillos y encendedores deben dejarse en la puerta de la planta. Se acondicionarán fumadores o se permitirá que se fume en las casas donde se cambia de ropa el personal.

RECIBO Y MANEJO DEL EQUIPO DE LA PLANTA. Si el trabajo se hace en una planta en operación, el propietario podrá exigir permisos

o procedimientos para recibir material o equipo entregado por ferrocarril, o camiones. Podrá exigir permisos a los camiones que salgan de la planta o a los automóviles. Si el propietario recibe todos los materiales, la responsabilidad del embarque, recepción, manejo y entrega en el lugar de la construcción deberá especificarse en esta forma y entenderse con claridad.

CONEXIONES CON FERROCARRILES Y CARRETERAS. Deberán determinarse con exactitud las rutas de transporte que utilizará el personal. El manejo de los materiales de la planta y el de los de construcción se simplificará mucho construyendo una vía muerta que comunique directamente la vía del ferrocarril más cercano con la planta.

REQUISITOS ESPECIALES PARA PROYECTOS EN EL EXTRANJERO

Los datos que se discutieron son los que se consideran esenciales para cualquier proyecto. Para los trabajos en el extranjero se necesita aumentar un gran número de datos preliminares, y de decisiones.

Permisos

Para el montaje de plantas en el extranjero, cuando la mayor parte del equipo, o de los materiales, se van a fabricar, en los E. U., es necesario obtener permisos generales o licencias, para poder exportar los diferentes artículos, y generalmente permisos de importación o licencias para poder llevar el equipo al país donde se va a montar la planta. Si este país no tiene salida al mar y los embarques tienen que atravesar un país vecino, serán necesarios permisos para mercancías en tránsito.

Las dependencias oficiales de los EE. UU., han clasificado numerosos materiales como esenciales para la economía nacional. Deben obtenerse permisos especiales para sacar estos materiales de los EE. UU. El destino y uso de esos materiales afecta la concesión de los permisos de exportación. Se pueden conseguir listas completas de todos los materiales esenciales, las restricciones aplicables según su destino, y explicaciones sobre los procedimientos necesarios en la Government Printing Office de los EE. UU.

Las solicitudes para permisos de exportación al gobierno de los EE. UU. deben ir generalmente acompañadas de una lista completa de todos los materiales, de los componentes del equipo, así como del peso o volumen, según sea el caso, y el valor en dólares de cada artículo. Se ha elaborado una lista alfabética y numérica para designar los diferentes artículos y la designación de esa lista es la que se debe emplear para solicitar los permisos. También es incluirá

una lista de las fechas en las que se harán los embarques por trimestres. Después, al ir enviando los embarques se tendrán que hacer nuevas listas de cada uno de éstos y comprobarse con la lista original.

La preparación de las listas detalladas se simplifica algo, porque la intención del gobierno es conocer los máximos, y no los valores precisos o exactos. Sin embargo, debe tenerse cuidado de llevar una cuenta fiel de los artículos a medida que se vayan embarcando. Como las restricciones en los permisos cambian con frecuencia, es obligatorio estudiar cuidadosamente cada número de todas las publicaciones que resulten aplicables de las diferentes dependencias.

Los datos necesarios para satisfacer los requisitos de los permisos de exportación sólo son suficientes en principio. Todos los artículos deben acompañarse en detalle, de la documentación ordinaria de exportación, para satisfacer los requisitos aduanales y de embarque. Los movimientos de los embarques al muelle, los almacenamientos, transporte por gabarra y manejo y formulación de los documentos de embarque, son funciones especializadas que requieren mucha experiencia. Todos estos trámites los manejan firmas especializadas que se llaman despachadores de carga o agentes despachadores. Estas firmas se encargan por una pequeña cuota del manejo completo de todos los embarques, incluyendo las notificaciones de embarque a los vendedores, terminación de los convenios de transporte nacionales y la preparación de los documentos normales. Esta cuota puede ser tan pequeña como ½ o 1% del valor declarado del envío. En realidad, en muchos de los grandes puertos de los EE. UU., resulta prácticamente imposible, o poco práctico, hacer embarques de exportación en cualquier otra forma. Además, la cantidad de materiales, o el número de embarques que serían necesarios para una obra, requerirían una organización bastante grande de personal experimentado, para enfrentarse a los innumerables problemas de embarque. Por lo tanto, usualmente se justifica contratar una firma experimentada en este trabajo.

Planeación del envío de las exportaciones

El costo principal del transporte de una exportación es el flete marítimo, el cual se cotiza con dos tarifas y se paga con la que resulte mayor: una es por peso en toneladas y la otra por volumen en unidades de 40 pies cúbicos (1.133 m^3). Las tarifas pueden referirse a la tonelada corta (2000 lb), a la tonelada larga, 2240 lb, o a la tonelada métrica de 2204.6 lb (1000 kg). El peso que se toma como base puede ser el bruto, que es el de la mercancía más el empaque, o el neto, según el destino. Las dimensiones de los bultos se toman de extremo a extremo y en ángulos rectos solamente. Los requisitos respecto a pesos y medidas varían con la zona internacional en cuestión, y pueden también variar con el portador, la mercancía o convenios de exportación.

Generalmente los despachadores pueden ahorrar a sus clientes una cantidad igual a, muchas veces, sus honorarios, previniéndoles a tiempo sobre la forma en que se fijan las tarifas de los fletes marítimos. Aunque las tarifas de fletes marítimos se basan en acuerdos internacionales, deberá estudiarse cuidadosamente la zona a la que se va a hacer el embarque. Deben estudiarse las tarifas normales, las restricciones respecto a mercancías, líneas de vapores que comunican la zona y los requisitos especiales de la región.

Los itinerarios marítimos están sujetos a cambios estacionales según lo requiera la carga. La fecha de salida de los transportes marítimos, excepto en algunas líneas de pasajeros, es aproximada. Aquí también el despachador puede ahorrar gastos a sus clientes, de muelle o lanchas, demorando el envío de piezas pesadas del equipo, evitando pagos causados por recibir el equipo antes de tiempo.

Como simple ilustración de los posibles pagos que haya que hacer por fletes marítimos, supóngase que se va a embarcar un tubo de 24 plg de diámetro y 30 pies de longitud, con peso de 3 000 lb. La tarifa que se va asignar será la que dé un flete mayor, considerando la de peso y la de volumen. Supongamos que las tarifas para esta mercancía son de $ 30.00 por tonelada de 2 000 lb o por 40 pies^3, pagando con la que el flete resulte mayor. El flete será 1½ por $ 30.00 o $ 45.00 tomando como base el peso. El volumen será $2 \times 2 \times 30$, o 120 pies^3, sin embargo, tomando como base el volumen, el flete será $(120/40) \times$ $ 30.00 o $ 90.00. Generalmente, también la forma afecta la tarifa. Supongamos que el tubo anterior se fabricó como codo con dos ramas de 15 pies. El volumen será entonces $15 \times 15 \times 2$ o 450 pies^3 y el flete sería $ 337.50. Este es, desde luego, un caso extremo. Deberá ponerse mucha atención a las formas y a los pesos si estas tarifas se van hacer efectivas.

Con frecuencia, es posible poner unos materiales dentro de otros, o empacarlos de manera que su peso por unidad de volumen sea el máximo, cuando el volumen gobierna el costo. Por ejemplo: el tubo anterior de 24 plg, podría llevar un peso adicional mucho mayor colocando un tubo de diámetro menor dentro del mayor. Si se van a poner en embalajes o a empacarse materiales relativamente livianos, como aislamientos juntos con materiales pesados, como conexiones sueltas de tubería, se puede aproximar el volumen de manera que tenga un flete igual al del peso. En este caso deberán estudiarse cuidadosamente las tarifas que se pagan según la mercancía. Algunas mercancías pagan más a causa de peculiaridades que exige su almacenamiento o manejo. Un bulto o embalaje que contenga una mercancía que paga tarifa elevada, puede aumentar el flete aunque la mayor parte de su contenido ordinariamente pagaría un flete menor.

Pueden cobrarse cargos adicionales de muelle y de gabarra llamados pagos por exceso de peso a embarques individuales si su

peso se excede de cierto límite. Estos cargos pueden representar una parte importante que requiere el transporte del equipo.

Todos los cargos deben determinarse cuidadosamente, tanto en el puerto (o muelle), en los Estados Unidos, como en el muelle de su destino. Una función del agente despachador es la de advertir a quien embarca, sobre dichos costos y problemas, y dónde es posible efectuar economías. Sin embargo, el agente despachador puede hacer muy poco con una pieza de equipo después que ha sido fabricada. Por tanto, deben tomarse en cuenta estas limitaciones al planear el diseño inicial.

La duración del viaje es un factor muy importante en las operaciones en el extranjero; porque este tiempo debe sumarse al prometido para la entrega por los vendedores, o fabricantes, para que el equipo llegue a tiempo. Debe hacerse un estudio completo de los barcos de carga que llegan al puerto de entrada, y de la duración del promedio de los recorridos. Ordinariamente, resulta ventajoso utilizar una sola línea de navegación. Puede llegarse a obtener convenios favorables respecto a fletes y a preferencia en el manejo.

Generalmente los barcos de carga no siguen un itinerario fijo durante todo el año, que podrá variar de puerto en puerto de acuerdo con la carga y el tiempo para cargar. Si se utiliza una sola empresa puede ser posible formular itinerarios definidos para reducir costos de almacenaje. Se deberá comunicar a la empresa naviera con la debida anticipación cuando se vayan a embarcar piezas de peso, o dimensiones extraordinarias, para que se reserve el espacio para su embarque.

Empaque de las exportaciones

Deben tomarse precauciones para proteger el equipo que se envía a países tropicales, contra la intemperie durante el viaje o durante su almacenamiento antes de la construcción. Se cuenta con un buen número de materiales plásticos (que no se adhieren) y que se quitan con facilidad, que pueden usarse para cubrir partes mecánicas o superficies terminadas durante el embarque.

Se discute mucho respecto a si deben empacarse las mercancías de exportación empleando preparaciones y empaques muy complicados. Si el envío va a descargarse principalmente en el lugar de la obra y se trasladará directamente del transporte (buque) al propietario o constructor, la necesidad de guardar mayores precauciones de embarque que las normales, será mínima. Sin embargo, si el lugar de la obra, o sitio de montaje, queda en el interior del país, o hay que emplear transportes adicionales, las paradas intermedias en los patios para mercancías extranjeras, o en vías muertas del ferrocarril, pueden convertirse en un problema serio: los robos. Esto es más probable en los países más atrasados. Parece ilógico suponer que los empaques que se hacen a los envíos dentro del país,

que usualmente son el mínimo absoluto, pueden ser suficientes en todos los casos. Desde luego, las partes pequeñas, sueltas, deben de empacarse dentro de embalajes, o bultos más grandes. Por esta razón, con frecuencia conviene contratar un almacén de depósito, o empacadora de exportaciones, en el lugar donde se concentren las mercancías. Estas firmas deben también ayudar al propietario a evitar los cargos por exceso de peso, y la mezcla de mercancías en las que una de éstas esté sujeta a tarifa muy elevada en un bulto, porque sería la causa de que se aplicara dicha tarifa a todos ellos.

Planeación de movimientos de carga en un país extranjero

Para establecer limitaciones en el peso, o tamaño del equipo, la investigación preliminar debe incluir la de todos los ferrocarriles y puertos extranjeros. Deberán inspeccionarse cuidadosamente las instalaciones del puerto de entrada para determinar la capacidad de descarga al muelle, la de las grúas o equipo elevador, espacio de almacenamiento, o de bodega, y el grado de protección que proporcionan. Deberán obtenerse datos sobre las tarifas de manejo en los muelles, de almacenaje y otros manejos. Con frecuencia es necesario comisionar personal al puerto de entrada para activar el trámite de la documentación y para que compruebe que los embarques se manejarán en forma correcta y que se enviarán rápidamente a su destino.

Cuando los muelles tienen vías de ferrocarril en el puerto de entrada, generalmente, se elimina el costo adicional de manejo y almacenamiento, ya que los bultos pesados se pueden descargar con las grúas del barco directamente a los carros del ferrocarril. Deberán obtenerse, de las compañías de transportes, datos sobre los fletes de ferrocarril, de las rutas, itinerarios, y duración de los recorridos de la carga. Si tienen que manejar los envíos varias compañías de transporte, o pasar por puntos de distribución, o por fronteras de otros países, puede ser necesario comisionar personal en esos puntos para acelerar su movimiento.

Deberá investigarse la capacidad de los ferrocarriles en servicio, incluyendo el tipo de su material rodante y sus itinerarios. En algunos de los países más pequeños pueden retrasarse mucho los envíos de equipo industrial pesado, a causa de la falta de carros adecuados para manejar esas cargas especiales.

Muchos de los ferrocarriles extranjeros son de vía angosta. Deberán obtenerse datos sobre el tamaño de los carros, y todas las limitaciones en tamaño, o peso, especialmente en la ruta que va a utilizarse. Si el ferrocarril es de vía angosta, las limitaciones en las dimensiones afectarán seriamente el tamaño del equipo fabricado. Estos datos deberán obtenerse al principio del proyecto, para poder dar a los manufactureros y fabricantes, especificaciones y dibujos. Las limitaciones en tamaño, a menudo, requieren que el equipo

principal se fabrique parcialmente, terminándolo en el lugar de la obra con el personal de construcción. Cuando sea necesario emplear este procedimiento, tendrán que conseguirse las herramientas necesarias y el personal especializado correspondiente.

Cada vez que se carga o descarga un equipo pesado, se gasta el tiempo del personal y del equipo elevador. Las conexiones directas del ferrocarril hasta la obra constituyen el método de transporte más barato. En la inspección preliminar debe determinarse qué conexiones son necesarias hacer al ferrocarril, para obtener los permisos necesarios para llevar la vía de alguna espuela hasta la planta. En el extranjero, la operación de conseguir permisos para hacer una conexión al ferrocarril puede durar mucho, por lo que deberán tramitarse lo más pronto que sea posible. En los países atrasados el equipo de vía escasea con frecuencia. Probablemente el montador ahorrará tiempo y gastos si proporciona los cambios, las agujas y otros accesorios para la conexión (el riel para el cambio o desvío puede ser de segunda mano). Deben obtenerse especificaciones para el desvío y para el peso de los rieles, porque la aguja, el riel de arranque, y el cambio se especifican rigurosamente con frecuencia. En los Caps. 21 y 25 se discuten con más extensión las especificaciones de ferrocarril y los métodos de construcción.

Si no hay ferrocarril, el montador tendrá que conseguir los camiones necesarios y equipo elevador, y, quizá, arreglar caminos provisionales hasta la planta. Se pueden obtener remolques de plataforma baja, con muchas ruedas, de capacidades casi ilimitadas; sin embargo, deberán estudiarse las piezas más pesadas del equipo permanente de la planta. Reduciendo el tamaño de las piezas que se fabriquen, se puede reducir el del equipo de transporte.

Planeación del equipo grande

Al principio debe hacerse una lista de todos los artículos grandes, o pesados, para descubrir las limitaciones en los embarques y tomar las medidas necesarias para evitar costos elevados de manejo y transporte.

La maquinaria pesada, como máquinas de combustión interna grandes, o compresores, que llegan a pesar 100 ton, pocas veces se embarcan completamente armadas. En el extranjero, las limitaciones en los embarques pueden reducir todavía más el peso que se puede dar a las partes armadas. Para completar el armado será necesario emplear personal especializado. Con objeto de que no se hagan cargos extras por desmantelamiento o empaque adicional de las exportaciones, debe notificarse al fabricante, de preferencia en la investigación inicial, cualesquiera limitaciones especiales en tamaño o peso.

Generalmente, los fabricantes de equipo mecánico grande exigen, algunas veces, la inspección de su equipo por sus propios inge-

nieros, antes de colocar la maquinaria sobre sus cimientos. También pueden exigir la presencia de su ingeniero cuando se inicie la operación del equipo, para satisfacer su garantía. Si el equipo se construye en el extranjero, estos requisitos deberán aclararse y acordarse o suprimirse, del contrato de compra, de manera que no se afecten las cláusulas de garantía.

Los grandes tanques de presión con diámetros mayores de 3.66 o 4.27 m, o los de longitud extraordinaria, de más de 18 o 24 m, a menudo, se fabrican parcialmente por los gálibos que se requieren en los ferrocarriles. En los proyectos foráneos las dimensiones y pesos pueden reducirse aún más. Por tanto, los datos de la investigación preliminar sobre las limitaciones de tamaño, deben quedar a disposición de los fabricantes de este tipo de equipo, como a los del equipo mecánico. Además, para la terminacion de los grandes recipientes por el personal de construcción, deberán suministrarse todas las herramientas, equipo necesario y personal especializado.

Remisión de correspondencia y planos a la obra.

En las obras foráneas se debe utilizar el correo aéreo para remitir especificaciones y la correspondencia. Los planos se envían por express aéreo, o como bultos postales aéreos, porque no se clasifican como correspondencia. En la investigación preliminar debe incluirse un examen de los requisitos de las aduanas del destino. En algunos países se abren todos estos paquetes para inspección, y conviene familiarizarse con los procedimientos y sistemas de inspección. En algunos países más pequeños, las autoridades locales pueden retener, sin notificación alguna, estén o no sujetos a impuestos, los paquetes que no contienen más que papeles ordinarios y copias de planos.

Algunas veces conviene enviar una máquina copiadora de impresión directa a la obra. Pueden mandarse los datos por correo en alguna forma que se puedan reproducir y después sacar copias conforme se vayan necesitando. Se debe comprobar que el proceso de copiado funciona en el clima en que va a usarse, y el efecto del clima en el papel para copia. Muchos de estos papeles se deterioran rápidamente cuando la temperatura, o la humedad, es elevada. El costo de enviar más papel puede exceder fácilmente al de enviar copias.

Personal de construcción

Las construcciones que hacen los contratistas de los EE. UU., en el extranjero requieren, usualmente, personal clave experimentado de los EE. UU. clasificado como artesanos. El porcentaje de los expatriados de EE. UU. empleados en el proyecto, en comparación con los nacionales, varía con el grado de industrialización del

país extranjero. En algunos países extranjeros es fácil obtener mano de obra especializada. Se deberá investigar cuál es el número de personal especializado que puede conseguirse, por las economías que se pueden obtener reduciendo el número de expatriados de los EE. UU.

Deberán examinarse y entenderse a fondo los reglamentos sobre trabajo, las leyes, las leyes sobre impuestos sobre la renta, y las de otros impuestos sobre el trabajo. En algunos países los reglamentos de trabajo son efectivos para el personal expatriado. Todas estas leyes, o reglamentos, deberán explicarse al personal expatriado cuando se le contrata. En las obras grandes es una costumbre establecida crear programas de entrenamiento para que los nacionales puedan especializarse en los diferentes oficios.

Contratar personal de construcción para operaciones foráneas es usualmente una operación difícil. Todo el personal que se contrata debe emplearse según el contrato por un número de meses determinado. Con frecuencia, se ofrece una bonificación como incentivo al terminar la obra. Debe someterse a todo el personal a un examen médico y se le deben aplicar todas las vacunas necesarias para satisfacer los requisitos de la zona en cuestión.

Si la obra está lejos de una ciudad, deben proporcionarse servicios médicos. Algunas veces es posible construir al principio de la obra parte de los edificios permanentes, los cuales se pueden acondicionar y utilizarse como hospitales durante el tiempo que dure la construcción. En países atrasados es, a menudo, imposible obtener el equipo médico. Deben tomarse medidas para dar servicio médico eficiente a todo el personal empleado, tanto nacional como extranjero, porque muchos países exigen que el patrón (especialmente el extranjero) dé atención médica a todos los empleados cualquiera que sea su nacionalidad. Además, su costo es insignificante comparado con la mala voluntad que se puede crear si no se proporcionan servicios médicos.

Los expatriados de los EE. UU., deben obtener un pasaporte y la visa de los representantes de los EE. UU. en el país en que se va a trabajar. Para obtener un pasaporte de los EE. UU., el interesado debe demostrar su ciudadanía con su acta de nacimiento, o con una declaración jurada; debe tener un certificado de buena conducta de la policía local y, generalmente, una carta del contratante en la que se explican las razones de su estancia.

Algunos países restringen y limitan la cantidad de efectos personales que puede llevar el empleado. Muchos países exigen el pago de impuestos sobre efectos personales, como zapatos y ropa, si son nuevos y sin uso. Deberán comprobarse estos requisitos y ponerse en forma impresa de manera que se puedan entender completamente.

Muchos contratantes compran seguros de viaje, o de vida a plazo fijo, de una u otra clase, sin costo para el empleado, pagaderos al

beneficiario de éste en caso de muerte o enfermedad. Este procedimiento es bueno para levantar la moral y no tiene un costo importante.

Es importante que el alojamiento sea adecuado. Todo el mobiliario debe ser durable y de buena calidad. Son importantes el buen alojamiento y la buena comida en cualquier obra foránea. Nada puede afectar la moral tanto, como las condiciones de vida malas, o la mala comida. Los ahorros en la comida ni siquiera se aproximan a los costos de transporte causados por el abandono de empleo de los trabajadores.

Un problema que se presenta con frecuencia en las obras foráneas grandes, es el del estado de soltería comparado con el familiar. Si es obligatorio proporcionar alojamiento, el número de trabajadores a los que se permita llevar a sus familiares puede convertirse en un renglón de costo importante. Se acostumbra, en obras foráneas, permitir al personal clave de la construcción llevar sus famibares a la localidad. Algunas veces, se acostumbra también emplear solamente solteros. Estos procedimientos y costumbres varían mucho con los propietarios y las firmas constructoras y también están regidos por las condiciones locales. Deben redactarse todos estos puntos e incluirse en una forma impresa o en el contrato del trabajador.

REFERENCIAS

1. Leeming, J., *Modern Export Packing*, Trade Promotional Series No. 207, Bureau of Foreign and Domestic Commerce, Dept. of Commerce, Washington, D. C., 1940.

CAPITULO 4

INGENIERIA DE PROCESO

La ingeniería de proceso trata del desarrollo, evaluación y diseño de procesos químicos. Quizá en ninguna otra fase de la ingeniería química puede el ingeniero aplicar de mejor manera los conocimientos técnicos y habilidad adquiridos en su educación superior. Aunque muchas compañías de operación pueden subdividir la ingeniería de proceso de departamentos de desarrollo, de análisis económico y de diseño, no es raro que un solo ingeniero de proceso origine un nuevo proceso y lo continúe, a través de las etapas de diseño, hasta una planta completa. Indudablemente, muchos ingenieros de proceso bastante experimentados, con base en sus conocimientos personales del proceso, son solicitados para dirigir como ingenieros de proyecto el diseño de una nueva planta.

La discusión completa de la ingeniería de proceso y, en particular, del diseño de proceso requeriría un texto sumamente extenso. No obstante, ciertos breves comentarios, relativos a las diversas fases de la ingeniería de proceso, ayudarán a integrarla en el cuadro global del diseño de la planta.

INVESTIGACION BASICA DE INGENIERIA

En los laboratorios de universidades y de institutos de investigación patrocinados por particulares se realiza, en bastante escala, investigación básica en los campos de química y de ingeniería química. Sin embargo, muchas de las industrias de proceso y varias firmas de diseño han encontrado necesario efectuar ciertos tipos de investigación básica. Es a este tipo industrial de investigación básica al que se refiere esta discusión.

Los productos nuevos a menudo se originan en los vasos de precipitados y tubos de ensayo de los químicos de laboratorios industriales al estudiar, en forma muy parecida a los químicos de una universidad o instituto de investigación, ciertos tipos de reacciones para adquirir conocimientos básicos. La diferencia consiste en que el químico industrial escoge reacciones que, si tienen éxito, logran de inmediato cierta significación comercial.

El ingeniero químico también está ligado en su profesión a la investigación básica. Muchas compañías llevan a cabo, en forma continua, programas experimentales sobre operaciones unitarias, cinética de reacciones y termodinámica. El propósito de dicha experimentación es alcanzar un mayor conocimiento de estas operaciones a modo de poder mejorar los procedimientos de diseño y de operación de la planta.

La industria química no puede progresar sin un abastecimiento continuo de conocimientos básicos e información nuevos. La primera industria química norteamericana obtuvo bastantes conocimientos básicos de Europa, particularmente en el campo de la química pura. Sin embargo, las universidades, institutos de investigación y laboratorios industriales de Norteamérica están proporcionando, en escala cada vez mayor, la investigación básica necesaria para el crecimiento de las industrias de proceso. El Congreso estableció la Fundación Nacional para la Ciencia (The National Science Foundation) para impulsar el desarrollo de las actividades de investigación básica en los Estados Unidos.

Un competente ingeniero de proceso debe mantener un íntimo contacto con los avances de la investigación básica en su campo particular. Esto lo lleva a cabo mediante una revisión periódica de la literatura y una estrecha asociación con los progresos de trabajo en su propia organización.

Desarrollo del proceso

Los principios nuevos de diseño, las reacciones modernas y los nuevos compuestos sugieren, por lo general, aplicaciones de importancia industrial que ponen alerta a la gerencia técnica. Tales aplicaciones pueden ser un nuevo proceso o la mejora de uno existente, requiriendo ambos el diseño y construcción de nuevos servicios y pudiendo implicar gastos de varios millones de dólares. Dado que una parte tan grande del diseño de ingeniería es de naturaleza empírica, rara vez es posible saltar del vaso de precipitados a la planta terminada. Debe efectuarse una considerable cantidad de lo que podría llamarse investigación de desarrollo aplicada. La información obtenida permite el diseño de equipo de proceso con un razonable grado de seguridad. El ingeniero de proceso que va a estar relacionado con el diseño y quizá con la operación fundamental de un pro-

ceso, llega a estar íntimamente asociado con el estudio en este punto. Debe ser provisto con todos los datos e interpretaciones de datos obtenidos en el laboratorio. Su experiencia en diseño y operación de plantas hacen su consejo en extremo valioso para los grupos de desarrollo. El ingeniero de proceso puede estar seguro de tener todos los datos necesarios posibles para los cálculos de diseño sólo si se mantiene en estrecha relación con el departamento de desarrollo del proceso.

El desarrollo del proceso a menudo comienza con un estudio en escala de laboratorio. Para obtener datos de naturaleza exploratoria se emplea equipo de vidrio o metálico en pequeña escala. Esta experimentación es valiosa porque con frecuencia constituye un procedimiento no costoso de probar la factibilidad de un proceso y de encaminar apropiadamente los esfuerzos ulteriores de investigación. El grado actual de conocimientos de ingeniería química rara vez permite el diseño de una nueva planta a partir exclusivamente de datos en escala de laboratorio. Existen tantas incógnitas e intangibles que han desafiado al análisis teórico, que es necesario evaluar de manera empírica estos factores en un equipo de mayor escala, el llamado equipo de planta piloto o de planta semiindustrial. En la operación de planta piloto o de planta semiidustrial, se sigue un proceso lo más parecido posible al que se empleará en la planta comercial, de manera que los datos obtenidos puedan ser utilizados con confianza al pasar de la escala de planta piloto al tamaño comercial.

Las plantas piloto son costosas en su construcción y operación. No es poco común que una sola planta piloto cueste cerca de un millón de dólares. Por consiguiente, es imperativo que para reducir la cantidad de trabajo requerido de planta piloto y, de ser posible, eliminarlo por completo, se utilicen todos los conocimientos teóricos disponibles para el ingeniero químico. Por ejemplo, en sencillo equipo de laboratorio es posible obtener datos de velocidad de reacción para una reacción nueva. Empleando principios de cinética aplicada pueden, entonces, desarrollarse ecuaciones de velocidad que permitirán el cálculo del tamaño del reactor para varias condiciones diferentes de operación, lo cual facilita la selección del diseño más económico con la mínima cantidad de datos experimentales. En tal caso, todavía puede considerarse juicioso operar una planta piloto con el fin de obtener datos acerca de corrosión, información sobre transmisión de calor y características generales de la operación del proceso. El conocimiento que sobre cinética se adquiriera en la operación de laboratorio, contribuiría grandemente en el diseño de la planta piloto e indicaría de manera definitiva la cantidad mínima de datos requeridos. Esta forma de aplicación de los conocimientos teóricos ahorra mucho tiempo y dinero, y es muy superior al procedimiento completamente empírico de "ahora ensayemos esto".

Aunque el método empírico de investigación ha tenido éxito en el desarrollo de las industrias de proceso, se debe realizar un continuo esfuerzo para confirmar los principios teóricos de las diversas operaciones unitarias, a modo de poder calcular más y más resultados, reduciendo así o eliminando completamente gran parte del trabajo de planta piloto o de planta semiindustrial actualmente requerido.

EVALUACION DEL PROCESO

La evaluación de un proceso consiste del análisis tanto de la ingeniería como de la economía del proceso y, en su sentido más amplio, es una operación continuada. Debe iniciarse, inclusive, antes de haber efectuado cualquier trabajo de laboratorio. Un cuidadoso análisis de costos en una etapa inicial, indicará si el proceso propuesto es prometedor, y también puede sugerir la dirección de las experimentaciones. La evaluación del proceso debe continuar a intervalos regulares, con objeto de cubrir de esta manera los datos nuevos y significativos que se vayan obteniendo.

Esta continua reevaluación de los factores de ingeniería y económicos en el proceso propuesto, ayuda a la planeación global del trabajo en escalas de laboratorio y de planta piloto. A menudo existen muchas maneras de efectuar una determinada operación unitaria, pero al considerar los aspectos económicos estas posibilidades pueden ser restringidas a sólo unas cuantas. Dybdal[2] ha presentado la relación de la evaluación del proyecto con el trabajo experimental bien planeado, particularmente de la planeación que se hace entre el trabajo de laboratorio y el de planta piloto. En esta etapa, uno de los factores menos tangibles en favor de la evaluación del proceso es que el hacer una estimación de costo requiere el conocimiento del equipo por emplear y, por consiguiente, fuerza automáticamente al ingeniero químico a razonar en forma objetiva. Este razonamiento inevitablemente sugiere muchos renglones de información que deben ser obtenidos de la operación de la planta piloto.

ESTIMACION DE COSTOS E INGENIERIA DE PROCESO

El tipo de estimación de costo requerida por los estudios hasta aquí mencionados, se denomina estimación de costos de diseño preliminar puesto que está basada únicamente en la información de que se dispone antes del diseño real del equipo de la planta. La estimación de diseño preliminar no sólo es valiosa porque dirige los proyectos de investigación por las trayectorias más ventajosas, sino porque también es un auxilio efectivo en los cálculos de diseño. A medida que progresa el diseño de una planta, con frecuencia se hacen evidentes ciertas alternativas para la operación de algunas partes

de la misma. Ejemplos típicos de factores por considerar en diseños alternativos, son las diversas disposiciones de cambiadores de calor, presión o temperatura de reactores y presiones de operación de absorbedores.

La estimación de costos no termina cuando se toma la decisión de construir una planta. A varios contratistas se les envía solicitud de presupuesto, y ellos deben hacer los cálculos preliminares de diseño y obtener cotizaciones de aquellos renglones del equipo de los que tengan pocos o ningunos datos recientes de costo. A partir de esta información los contratistas preparan estimaciones preliminares de costo sobre las cuales basan sus ofertas. Si el contratista hace una cotización en firme, su análisis de costos debe ser excesivamente meticuloso y para asegurar la obtención del contrato debe evitar las contingencias al máximo posible. Los llamados contratos a porcentaje, que en general son populares durante los programas acelerados de construcción típicos de los tiempos de guerra, protegen al contratista de las incalculables contingencias que siempre se presentan en proyectos precipitados que entrañan riesgos considerables. Conforme el trabajo de diseño y construcción avanza en un proyecto, el cliente generalmente solicita, cada mes u otro plazo periódico que le convenga, nuevas estimaciones del costo final. Cada estimación sucesiva es más exacta, ya que a medida que el trabajo se aproxima a su término se dispone de más información. Estos datos siempre llegan a ser de gran valor para el contratista en estudios de costos de sus propias operaciones.

Con frecuencia el "excedente" de las estimaciones preliminares puede ser atribuido a adiciones o a mejoras del diseño original. Los dibujos de diseño suelen circularse a través de los diversos departamentos de la empresa del cliente y durante este proceso a menudo surgen ideas sobre adiciones a la planta. Por consiguiente, el ingeniero de proyecto del cliente puede controlar mejor el costo solicitando frecuentes reestimaciones del costo final de la planta.

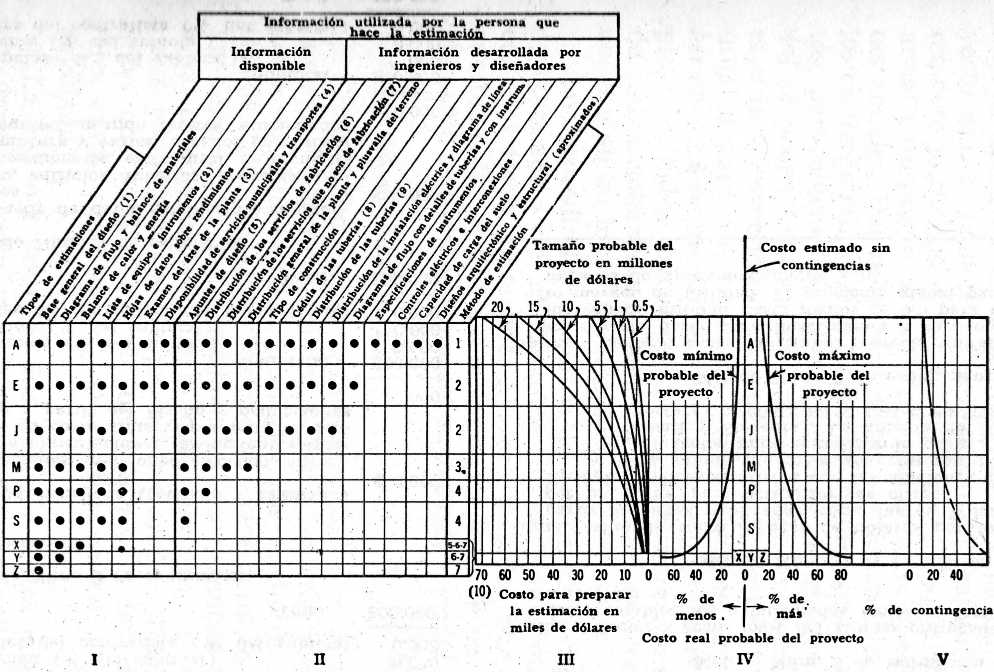
La evaluación económica de los procesos debe continuar aun después de que una planta entra en operación. Los planes para aumentar la producción o para obtener costos más bajos de producción deben ser evaluados siempre sobre una base económica. La evaluación del proceso y su instrumento primordial, la estimación de costos, penetran en cada fase del desarrollo, diseño, construcción y operación de una planta.

Tanto las compañías de operación como las firmas de construcción poseen competentes departamentos de estimación de costos. Estos grupos son divisiones de la organización central de ingeniería y, por lo común, están constituidos por hombres de considerable experiencia en trabajos de estimación de costos. Es muy frecuente

que cada persona se especialice en una fase de la estimación, como tuberías o recipientes. La obligación principal de estos departamentos es desarrollar estimaciones de costos, lo más precisas posible, basadas en informaciones de diseño razonablemente firmes y en los costos disponibles más recientes de equipo. Tales estimaciones son tardadas y costosas, pero son necesarias para que los contratistas puedan establecer cotizaciones o las compañías de operación sus estimaciones de asignación, las cuales son presentadas a la gerencia antes de la asignación definitiva de fondos para un proyecto.

Sin embargo, los ingenieros químicos que actúan como ingenieros de proceso o como ingenieros de proyecto, para ayudar en las decisiones de diseño y en la dirección de investigación y desarrollo, a menudo requieren estimaciones más rápidas y menos costosas. El ingeniero de proceso o de proyecto siempre puede requerir, del departamento de estimación de costos de su empresa, una estimación detallada. No obstante, se debe hacer notar que tales estimaciones son costosas y para muchos propósitos no son necesarias. Nichols[6] ha presentado excelentes comentarios sobre métodos de estimación de capital, abarcando desde el método meramente aproximado hasta una estimación detallada. La Fig. 4-1, presentada por Nichols, muestra un cuadro con nueve diferentes tipos de estimación con grados variables de precisión basados en la información disponible. A partir de esta figura se puede determinar el costo aproximado requerido para preparar una estimación de cada tipo. Se proporciona la precisión de esta estimación y la recomendación de una contingencia para cada tipo de estimación. Dicho cuadro, que está basado en ciertas observaciones reales de una gran empresa, constituye una ilustración del tipo de cuadros que resultan de utilidad en la selección del tipo de estimación más apropiada para un propósito dado (*). Nichols ilustra su aplicación suponiendo un proyecto de cinco millones de dólares y comparando una estimación tipo A, la más exacta, con una estimación menos exacta, tipo J. El costo de la estimación tipo A sería aproximadamente $ 25 000, en tanto que para el tipo J sería de $ 9 000. La mejor estimación tijo J daría un margen de un 30% entre el mínimo y el máximo del costo real, mientras que el margen en la estimación tipo A sería de aproximadamente 20%. ¿Justificará el aumento de precisión en el margen, de 30% a 20%, el costo adicional de $ 16 000 requeridos por la estimación tipo A? En muchos casos, particularmente en estudios de diseño, dicho costo agregado de cierto no sería justificable. Con demasiada frecuencia se malgastan tiempo y dinero tratando de hacer estimaciones de costos de proyectos con mayor precisión de la que es posible lograr con los datos técnicos disponibles.

* Cada grupo que desee utilizar un cuadro como ése, debe construir su cuadro particular basado en su propia experiencia.



1. Producto por hacer, especificaciones y provisiones de almacenamiento; capacidad de la planta; tiempo continuo de operación; provisiones para expansiones; materias primas, fuente y almacenamiento.
2. Muestra el número de cada renglón de equipo requerido, su capacidad y materiales de construcción.
3. Valor del terreno y plusvalía del mismo.
4. Descripción de las facilidades de laboratorio y servicio requeridas.
5. Renglones no usuales de equipo.
6. Muestra el equipo en planta y en elevación.
7. Servicios municipales y generales, caminos, drenajes, etc.
8. Tamaños, materiales de construcción.
9. Sobrepuesta en la distribución del equipo y de la planta.
10. El costo de preparación de las estimaciones no considera estudio alguno de alternativas y no dará lugar a dibujo alguno de construcción o especificaciones. No incluye el costo de preparar la información disponible o el costo de investigaciones del subsuelo para determinar las capacidades de carga del suelo.

FIG. 4-1. Comparación de métodos de estimación de costos (Reimpreso con autorización de W. T. Nichols, *Ind. Eng. Chem.*, 43, 2297 (1951); basada en una técnica desarrollada por E. H. Buford, M. Welhoelter y R. E. Wright, de Monsanto Chemical Company.)

Método Núm. 1 de estimación

A. Costo cotizado del equipo entregado	$ 0.000
B. Costo estimado de instalación para cada renglón de equipo	0.000
C. Costos separados de materiales para los renglones de tuberías, eléctrico, arquitectónico, estructural, de instrumentos, etc.	0.000
D. Mano de obra estimada a partir de factores prácticos para los renglones comprendidos en *C*	0.000
Subtotal	$00.000
E. Ingeniería y contingencias (% del subtotal)	0.000
F. Servicios de construcción (% del subtotal)	0.000
G. Honorarios o utilidades del contratista (% del subtotal)	0.000
Total	$00.000

Método Núm. 2 de estimación

A. Costo del equipo instalado = $\dfrac{\text{costo del equipo entregado (cotizado y estimado)}}{0.70}$	$ 0.000
B. Edificios, tuberías, drenajes, renglones eléctrico, instrumental, estructural, de cimentaciones, aislamientos, pintura y varios, basados en costo unitario por renglón, longitud, área o volumen a partir del diseño y deducciones de costo preliminares	000
Subtotal	$00.000
C. Ingeniería y contingencias (% del subtotal)	0.000
D. Servicios de construcción (% del subtotal)	0.000
E. Honorarios o utilidades del contratista (% del subtotal)	0.000
Total	$00.000

Método Núm. 3 de estimación

A. Costo del equipo a partir de datos establecidos o publicados y de cotizaciones	$ 0.000
B. Instalación del equipo, edificios, tuberías, drenajes, renglones eléctrico, de instrumentos, estructural, de cimentaciones, aislamientos, pintura y varios, basados en porcentajes del costo del equipo, usando factres sancionados por la experiencia	0.000
Subtotal	$ 0.000
C. Ingeniería y contingencias (% del subtotal)	000
D. Servicios de construcción (% del subtotal)	0.000
E. Honorarios o utilidades del contratista (% del subtotal)	0.000
Total	$00.000

Método Núm. 4 de estimación

Capital = factor × costo total del equipo entregado, determinado por cotizaciones en los renglones no usuales, y a partir de datos establecidos o publicados en los otros renglones.

Factores

Para planta de proceso de sólidos	3.10
Para planta de proceso de sólidos-fluidos	3.63
Para planta de proceso de fluidos	4.74

Método Núm. 5 de estimación

Capital = factor × costo total del equipo entregado, determinado por datos establecidos o publicados (mismos factores que en el método Núm. 4)

Método Núm. 6 de estimación

Capital estimado sobre la base de dólares por tonelada por año, a partir de cifras publicadas, como las de Wilcoxon, multiplicadas por un factor para actualizar las cifras.

Ejemplo: Wilcoxon afirma que las adiciones en 1942 a una planta grande de amoniaco costaron 86 dls/ton por año. El factor para actualizar la cifra a 1951 = 1.84 (Marshall y Stevents). La adición de 30 000 ton por año, costará: 30 000 × 86 × 1.84 = $4 800 000.00

Método Núm. 7 de estimación

Capital = factor × capacidad anual × precio unitario.

El factor varía desde aproximadamente 2 para operaciones con bajo margen de utilidad hasta menos de 0.5 para operaciones con alto margen de utilidad. El promedio global para la industria química es de aproximadamente 1.0

Estimaciones para evaluación económica

La evaluación económica es una guía indispensable para decisiones del proceso. Estas incluyen decisiones requeridas para dirigir la investigación, el diseño del proceso, los desembolsos de capital (asignaciones de fondos solicitadas de la gerencia) y las condiciones óptimas de operación de la planta. Una evaluación completa de un proyecto nuevo requiere la estimación del capital fijo, nuevo, que se requiere junto con el capital de trabajo. Suponiendo una producción anual y un precio de venta del producto, se pueden calcular las ventas anuales. Del valor total de las ventas anuales, se pueden deducir los costos de fabricación, venta y administración, así como los impuestos, para obtener la utilidad después de impuestos que es esperada del proyecto. Esta utilidad puede entonces expresarse como porcentaje de la inversión de capital, lo cual arroja una cifra de bastante utilidad para ser estudiada por la gerencia. Por supuesto, muchos estudios no requieren una completa evaluación económica. Por ejemplo, para hacer una selección entre diversos diseños o distribuciones de equipo solamente se necesita efectuar una comparación del costo del equipo en los diferentes casos.

Los procedimientos cortos para estimar el capital fijo, los costos de fabricación y el rédito anual son de lo más útiles cuando se usan con el criterio apropiado. Muchos métodos han sido publicados. A continuación se presentan varios de los que en general son favorablemente considerados por los ingenieros especializados en la materia.

Estimación del capital fijo

Cuando el diseño de las instalaciones nuevas ha progresado hasta la etapa de diseño mecánico, el procedimiento más exacto de estimar los costos finales de la planta es por medio de una estimación detallada de costos, como las que de manera típica son producidas por los departamentos de estimaciones económicas integrados por personal especializado en la materia. Empero, las estimaciones requeridas por ingenieros de proceso invariablemente deben ser hechas antes que se disponga de una gran cantidad de información. En tales casos, rara vez se garantiza la exactitud de una estimación detallada.

La Fig. 4-2 presenta dos métodos cortos que han resultado ser populares. El primero, debido a Lang,[5] se aplica mejor para las denominadas estimaciones "rápidas" y también es útil para comprobar el trabajo de otros ingenieros. El costo total estimado de equipo se multiplica por un factor para obtener el costo total de la planta. El método de Chilton[1] ofrece una estimación más detallada y permite la variación de partes importantes del costo de la planta de acuerdo con el criterio del estimador y con su conocimiento de la situación particular. Chilton presenta una serie de curvas que dan

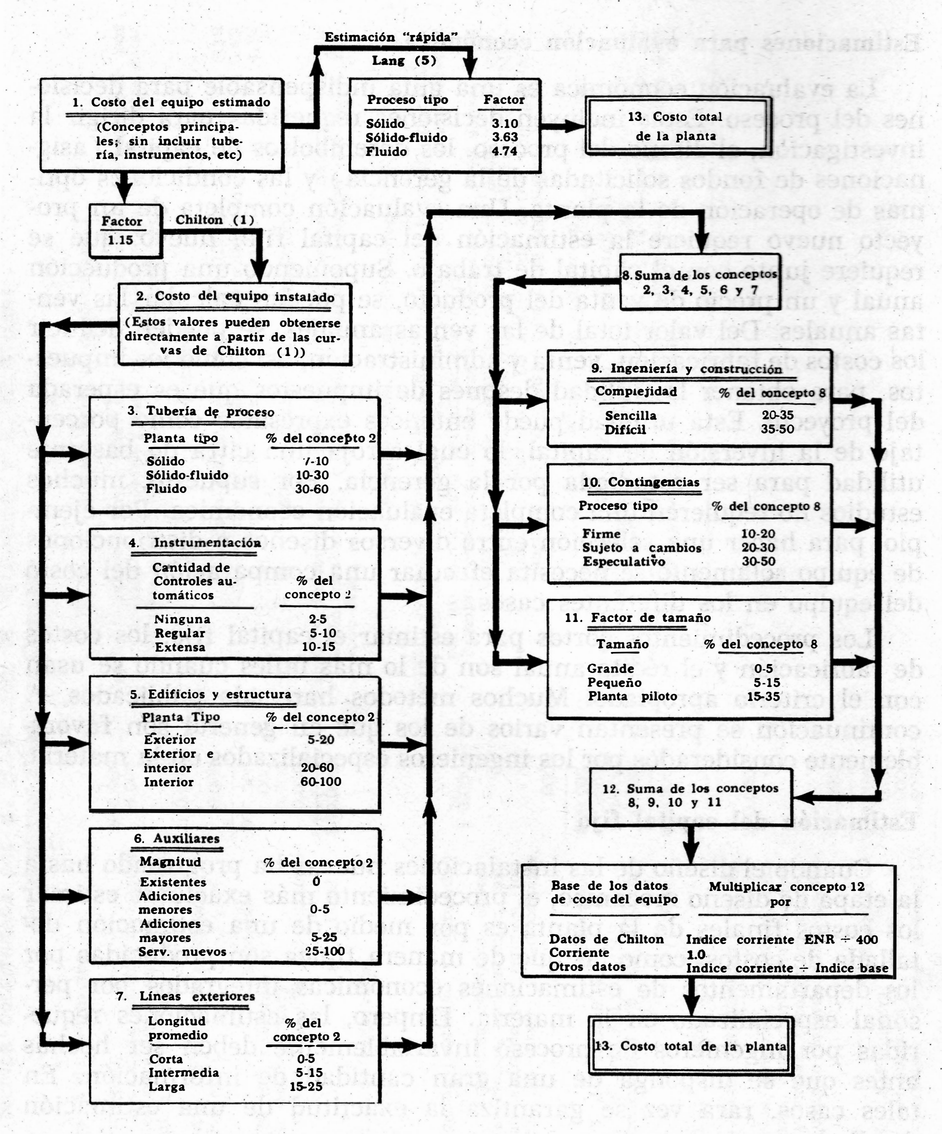


FIG. 4-2. Estimación de los costos totales de la planta

el costo instalado de diversos renglones del equipo basados en un índice de 400 del *Engineering and News Record.* El costo final de la planta se corrige entonces a un costo corriente multiplicando por la relación del índice corriente del *Engineering and News Record* al índice base de 400.

Muchos ingenieros especializados en el tema han desarrollado procedimientos similares para su propio uso, a partir de la información disponible en el departamento de compras de la compañía.

Rápidamente pueden ser trazadas las curvas de costo para los renglones de equipo que con más frecuencia se utilizan en una industria dada. Para evitar una continua revisión de estos datos, los costos corrientes pueden ser estimados multiplicando el costo original por la relación de un valor corriente de algún índice de costos publicado, al valor del índice sobre el cual los cuadros están basados. Se puede disponer de varios de dichos índices. El índice compilado por *Engineering and News Record* está basado en gran parte en los costos del acero, madera para construcción, materiales para cimentaciones y mano de obra. La firma Marshall and Stevens, de Chicago, Illinois,[8] publica trimestralmente índices para costos de equipo, cubriendo varias industrias diferentes. Ocho de estos índices son para industrias de proceso, y han sido encontrados de suma utilidad por muchos ingenieros de proceso.

En la Fig. 4-2 el término edificio y estructura incluye la sustentación y la cimentación. En la selección de los porcentajes apropiados para los conceptos 3 a 11 se debe aplicar el criterio a modo de asegurar la máxima exactitud. Algunas plantas requieren tuberías de aleaciones especiales, lo cual puede incrementar grandemente el renglón del costo de la planta debido a las tuberías. De manera similar, las condiciones de la cimentación también deben ser cuidadosamente evaluadas. Si se requiere piloteado, el costo de la cimentación puede aumentar hasta en 25%. Es importante, por consiguiente, comprender que una exactitud razonable en un costo de planta por una estimación del tipo antes descrito, requiere el desarrollo de una cantidad considerable de un sólido criterio de ingeniería, basado en la experiencia de muchos proyectos previos. Los porcentajes sugeridos, propuestos por Chilton, son para usarse como guías y deben corregirse siempre que se considere necesario para la situación especial que se esté evaluando.

Tanto en la aproximación del costo de renglones sencillos de equipo como en la de plantas enteras, Williams[9] ha sugerido que el costo conocido de una unidad similar pero de diferente tamaño se multiplique por la relación de tamaños elevada a la potencia 0.6. Por ejemplo, considerando un cambiador de 1 200 pies^2, que se vende en \$4 000, estimar el costo de un cambiador, de construcción similar, de 2 000 pies^2. Este costo sería $\$4\,000 \times (2\,000/1\,200)^{0.6} = \$5\,440$.

Costo de fabricación

El costo total de fabricación puede ser estimado como lo propone Dybdal[2] y como se describe en la Fig. 4-3. Dicho costo es la suma de mano de obra, gastos generales (*overhead*), costos fijos y mantenimiento, materias primas, servicios, gastos de laboratorio y regalías. En la Fig. 4-3 se proporcionan multiplicadores para obtener los costos fijos anuales más el mantenimiento y los gastos generales (*over-*

* Algo así como Oficina de Ingresos Interiores (N. del T.).

FIG. 4-3. Estimación de los costos de fabricación. (Base anual. Unicamente costo bruto basado en el trabajo de E. C. Dybdal[2])

head). Sin embargo, en donde sea posible, estos valores deben ser calculados mediante un procedimiento en varios pasos. Los impuestos, por ejemplo, representan una proporción tan grande de los costos fijos y están sujetos a variaciones tan extremas que sería recomendable usar las tarifas reales vigentes. Actualmente, una gran parte de los gastos generales (*overhead*) está representada por el renglón designado como costos de nómina. Estos costos incluyen las diversas prestaciones, tales como los planes de pensión, hospitalización, servicios recreacionales a los empleados y paga de vacaciones. Dichas prestaciones han seguido aumentando año con año y representan una gran parte de la cuenta total de mano de obra. Los costos de materia prima pueden ser obtenidos de publicaciones comerciales, pero las cotizaciones reales de los costos que se esperan en el sitio particular de la planta son, por supuesto, más apreciadas.

Existen muchas agencias de gobierno, tanto federales como estatales, que proporcionan las tarifas de salarios de varias localidades, y se recomienda usar estos valores precisos en vez de algunas tarifas de salarios propuestas en manuales. La mano de obra representa una parte tan grande del costo de fabricación, que los errores de cierta significación al estimar el costo de la mano de obra pueden echar por tierra la exactitud de toda la evaluación económica.

Rédito anual

El interés primordial de la gerencia es, por supuesto, la ganancia neta que es de esperarse de un proceso o planta nuevos. El siguiente procedimiento general sugiere un medio de obtener este valor y es de utilidad para resumir la información requerida por la gerencia.

Resumen de los requerimientos de capital

Capital fijo, nuevo. Se estima a partir de la Fig. 4-1. Si las instalaciones se van a localizar en una planta existente y por esta razón se aprovecha el equipo existente de generación de vapor y energía eléctrica, parte del valor de dicho equipo debe ser cargado a la nueva instalación. Muchas plantas grandes han adoptado la política realista de cargar al capital fijo requerido por los nuevos servicios, una parte prorrateada de todas las inversiones en servicios, a pesar de que éstos ya existan. Este movimiento en libros efectivamente acumula capital para una expansión definitiva de servicios en alguna fecha posterior y permite que todas las unidades de la planta participen en dicha expansión.

Capital de trabajo. (1) Inventario de materia prima; (2) material en proceso; (3) inventario de producto y almacenes (refacciones, etc.); (4) cuentas por cobrar, cuentas operables en efectivo, y otros; 15% de las ventas anuales.[2]

RESUMEN DE GANANCIAS

Se determina (*a*) la producción anual y (*b*) el precio de venta, de preferencia calculándolo sobre la base de varios precios de venta posibles; luego se calculan (*c*) las ventas anuales ($a \times b$); (*d*) la utilidad bruta: Inciso *c* menos la suma de los costos de fabricación y los costos de empaque y embarque; (*e*) utilidad neta antes de impuestos: Inciso *d* menos la suma de los costos de venta, administración e investigación (aproximadamente el 10% de las ventas anuales); (*f*) utilidad neta después de impuestos: Inciso *e* menos los impuestos. Siempre se deben verificar las tarifas más recientes de impuestos. En los últimos años los impuestos para las compañías han variado considerablemente.

RÉDITO SOBRE LA INVERSIÓN

Este valor se expresa más convenientemente como un porcentaje del capital fijo o de éste más el capital de trabajo requerido. Los ejecutivos encuentran de utilidad hacer sus juicios calculando este rédito sobre la base de utilidad neta tanto antes como después de impuestos.

PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO DE PROCESO

Base del diseño

Antes de proceder con cualesquiera cálculos de diseño, es esencial establecer por escrito una base completa del diseño. Esta debe incluir la cantidad y calidad de productos deseados, las materias primas y sus características, los servicios y sus temperaturas y presiones, y otros factores tales como la probable aplicación de los subproductos. Simultáneamente se deben hacer otras dos importantes decisiones. Estas son la selección de los factores de seguridad que se van a usar en el diseño y la fijación de la fecha en que se ha de dar término al diseño de proceso.

La primera decisión, los factores de seguridad, es un renglón importante pero que a menudo se desprecia. Frecuentemente, numerosos factores ocultos de seguridad se introducen en el diseño de un solo equipo conforme diversos individuos trabajan en diferentes fases de su desarrollo. Este procedimiento puede muchas veces conducir a diseños en exceso conservadores y con costo adicional innecesario. Es preferible usar un factor de seguridad, mismo que para cada tipo de equipo deberá ser seleccionado al comienzo del trabajo.

La segunda decisión, el tiempo para terminar el proyecto, es más importante de lo que podría parecer por una observación casual. El tiempo disponible para un diseño de proceso determina todo el método de enfoque. Si sólo se dispone de un tiempo corto, es imposible

intentar cualesquiera cálculos rigurosos que consuman mucho tiempo. En lugar de ello, es necesario hacer variar suposiciones basadas en trabajos previos, y se debe estar preparado para aceptar los riesgos inherentes a tal procedimiento. Ciertamente, es juicioso tomar estas decisiones antes de proceder con el diseño real, ya que la filosofía de los factores de seguridad debe ser correspondientemente influida.

Diagrama esquemático de flujo y balance de materiales y energía

Por lo general, para un proceso antiguo la experiencia determina el arreglo más deseable de equipo. Si el proceso es nuevo, el trabajo experimental y la evaluación económica deben suministrar la información esencial para elegir las operaciones unitarias requeridas. El trabajo experimental no siempre es completo, y el ingeniero en diseño de proceso debe reconocer cualesquiera deficiencias que existan, con objeto de poder solicitar los datos adicionales. Se han diseñado y construido plantas con base en datos experimentales para la fabricación de un nuevo producto, pero sin datos para la purificación del mismo. Las operaciones de purificación que se diseñaron sin el beneficio de los datos de laboratorio, resultaron inadecuadas y fueron la causa de que toda la operación fracasara económicamente.

Suponiendo que existe información adecuada, el ingeniero de proceso debe construir un diagrama esquemático en el cual se indiquen todas las operaciones requeridas para la producción de la cantidad y calidad deseadas del producto acabado. Cada una de las operaciones unitarias que se necesitan pueden ofrecer diversas alternativas desde un punto de vista económico. Entonces deben hacerse balances de materiales y energía alrededor de cada unidad, y los resultados registrarse de una manera ordenada de tal modo que puedan ser empleados para los muchos cálculos de diseño de renglones individuales de equipo y para el establecimiento de especificaciones por escrito. El orden y la limpieza son valiosas características en este tipo de trabajo. Cuando en el diseño de proceso de una planta se cuenta pronto con un diagrama de flujo que se pueda entender con facilidad y con un balance exacto de materiales y energía, se eliminan muchos errores y se puede tener a varias personas trabajando eficientemente en diversas fases del diseño.

Procedimientos de diseño

El procedimiento usual de diseño de proceso podría ser separado en dos divisiones principales. La primera implica el diseño real del equipo que se va a construir bajo pedido. La segunda consiste en especificar las condiciones de operación para equipo de fabricación estándar. A la primera categoría pertenecen equipos tales como torres de destilación, torres de absorción, unidades de adsorción y extrac-

ción, y reactores. Equipos que implican transferencia de masa se diseñan mediante el cálculo del número ideal de etapas o del número de etapas de equilibrio (en destilación esto sería el número de platos). El número real de etapas se determina entonces por la aplicación de eficiencias apropiadas, empíricamente determinadas.

En algunos casos se ha encontrado más recomendable emplear, una etapa diferencial en lugar de una etapa de equilibrio y determinar mediante una integración, el número de unidades de transferencia. La altura de una unidad de transferencia puede ser estimada por medio de ciertas correlaciones generalizadas. El diseño de columnas empacadas se hace de esta manera.

Los reactores se diseñan con la aplicación de cinética química, como lo describe Hougen and Watson[4]. A partir de datos experimentales se determinan ecuaciones de velocidad, después de lo cual se evalúan constantes empíricas para las ecuaciones. Si el efecto de la temperatura sobre estas constantes ha sido establecido, es posible calcular tamaños de reactor para diversas condiciones supuestas de operación. Esta técnica permite un completo análisis económico del diseño del reactor, sin una experimentación excesiva. No obstante, en muchos casos las reacciones son tan complejas que el análisis racional por los principios de la cinética aplicada es sumamente difícil en el estado actual de conocimientos. En este caso se debe usar el procedimiento empírico de planta piloto, en el cual las condiciones óptimas de operación se determinan mediante un programa planeado de experimentación que requiere cientos de corridas y, por consiguiente, un gasto considerable. La aplicación de la cinética y de la teoría de transferencia de masa en el trabajo de planta piloto debe ser intentada siempre que sea posible, puesto que contribuirá grandemente en la limitación de la cantidad de investigación tipo Edisoniana requerida.

Una gran parte del equipo para las otras operaciones unitarias que comúnmente se emplean en las plantas de proceso pertenece a la segunda categoría. En realidad dicho equipo no es diseñado por el ingeniero de proceso, aunque el conocimiento de la teoría relacionada con cada tipo de equipo es de extrema utilidad. Renglones de equipo tales como cribas, trituradoras y molinos, clasificadores, sedimentadores y espesadores, bombas, compresoras, cambiadores de calor, filtros, centrífugas, cristalizadores, agitadores y evaporadores, todos ellos se compran de compañías especializadas en uno o más de dichos renglones. La teoría para el diseño de la mayoría de estos equipos está muy difusa y el empirismo es la única guía. Por ejemplo, la selección apropiada de un agitador debe ser puesta en manos de un fabricante que se haya especializado en la construcción de agitadores y que tenga un considerable catálogo de datos experimentales y de operación real. El fabricante puede, por la aplicación de los principios de similitud dimensional, especificar la instalación de

un agitador grande sobre la base de pruebas efectuadas en equipo pequeño de laboratorio. Procedimientos similares son seguidos por los fabricantes de filtros, secadores, centrífugas y otros equipos de este tipo.

El ingeniero de proceso debe estar familiarizado con los métodos de selección utilizados por el fabricante, de tal modo que las especificaciones de operación requeridas por cada renglón del equipo puedan ser inteligentemente compiladas. De esta manera, para el fabricante no será necesario sostener una correspondencia voluminosa para obtener los datos adicionales requeridos por la selección del renglón deseado. En capítulos subsecuentes se proporciona información para contribuir en la selección de diferentes tipos de equipo.

En la especificación de condiciones de operación para el equipo o en el diseño original del equipo de proceso, es esencial que el ingeniero de diseño seleccione los materiales de construcción. Nadie está más familiarizado con el proceso que el ingeniero de proceso; y él, por consiguiente, está en una posición favorable para ayudar al diseñador mecánico en la correcta especificación de materiales que resistan a la corrosión y a la erosión. Existen muchas tablas de fácil manejo que se han impreso para contribuir en la selección de un material de construcción que resista la corrosión de una sustancia dada. Estas tablas sirven solamente como guías preliminares y en su empleo se debe tener mucho cuidado. A menudo un ligero cambio en las condiciones de temperatura puede hacer que se corroa un metal que de ordinario soportaría el ataque del fluido en cuestión. El estudio de la corrosión es aún bastante empírico, y para el ingeniero común no es posible conocer los últimos desarrollos, puesto que la combinación de materiales y agentes corrosivos es casi ilimitada. Esto hace pensar que en todos los casos, con excepción de los más simples, se deba consultar a un ingeniero en corrosión. También han resultado de suma utilidad las excelentes publicaciones periódicas sobre esta materia.

Mientras el diseño y la selección del equipo de proceso se completan, las especificaciones de cada equipo deben resumirse de una manera ordenada. Muchas organizaciones han desarrollado formas para los diversos renglones de equipo. Estas formas aseguran nitidez en la presentación y también evitan que el ingeniero pase por alto algunos datos importantes de la información. Una vez llenas, las formas pueden ser reproducidas y distribuidas a otros departamentos en la firma de ingeniería para ser integradas dentro del diseño completo de la planta. En adición a estas especificaciones, se recomienda producir un diagrama final del flujo del proceso. Este diagrama muestra todos los renglones principales del equipo, proporciona temperaturas, presiones y flujos en todas las partes del proceso. De este modo el diagrama se convierte entonces en una inva-

luable ayuda para los especialistas que deben trabajar en el diseño mecánico de la planta.

El ingeniero de proceso debe preparar una descripción escrita, breve, pero completa, de la operación de la planta. Esta descripción le sirve tanto a la gerencia como a todos los otros ingenieros y diseñadores que deben contribuir al diseño final. La distribución de esta información, sin embargo, debe hacerse con mucho cuidado. Operarios con poca experiencia para comprender datos técnicos de proceso pueden interpretar erróneamente la información, con resultados posiblemente desastrosos.

EL INGENIERO DE PROCESO Y EL INGENIERO DE PROYECTO

Aunque el ingeniero de proyecto tiene a su completo cargo el diseño y la construcción de la planta, es necesario que el ingeniero de proceso esté preparado para ayudar en cualquier momento al ingeniero de proyecto. Normalmente, una vez que el diseño del proceso se ha completado, el ingeniero de proceso será trasladado a otra asignación, aunque las preguntas relativas al proceso continúan presentándose a medida que el diseño mecánico avanza. El ingeniero de proyecto, a pesar de tener experiencia en diseño de proceso, debe simpre referir estas preguntas al ingeniero de proceso que dirigió el diseño original. Unicamente él conocerá las bases de los cálculos de diseño.

Para el ingeniero de proceso es de gran valor, conforme la construcción avanza, acompañar al ingeniero de proyecto en visitas al sitio de la planta, con objeto de estar mejor capacitado para tomar decisiones relativas a cambios en el diseño o en la distribución de equipo. Las compañías interesadas en desarrollar su tecnología de diseño* deben permitir a los ingenieros de proceso seguir las operaciones de arranque de plantas nuevas, y el ingeniero de proceso debe emplear su tiempo en acumular datos de operación. Estos datos no deben ser puestos en los archivos de la compañía, sino que deben ser analizados cuando aún están "frescos" y pasar a ser una parte definida de la experiencia de la operación de la empresa.

FUNTES DE DATOS BASICOS

Además de los datos experimentales o datos de operación que se usan en el diseño de equipo, también se requiere una gran cantidad de datos básicos, de naturaleza física y química. Muchas compañías mantienen excelentes libros de datos en los cuales toda esa información se acumula y se revisa periódicamente. A menudo un depar-

---

* *Design know-how,* en el original (N. del T.)

tamento se ocupa exclusivamente de llevar al día el libro de datos. Los ingenieros que no disponen de tal información pueden reunir datos solicitando reimpresos de información básica que aparezca en la literatura y obteniendo recopilaciones de datos que hayan sido publicados a través de los años. La siguiente lista contiene algunas recopilaciones recomendables de datos que han demostrado ser útiles y populares entre ingenieros experimentados. No se pretende citar la inmensa cantidad de datos que han aparecido en las publicaciones periódicas, ni los muy valiosos datos que son publicados por los fabricantes de diversos productos químicos. No se considera que la lista de referencias esté completa, pero es de recomendarse aunque cierto material se haya omitido. Algunas de estas referencias son deseables como parte de una biblioteca personal, lo cual se indica mediante un asterisco, aunque muchas de ellas son caras y estarían mejor como parte de la biblioteca de una compañía para un uso técnico general.

A. BIBLIOGRAFIAS Y REVISIONES

1. Katz, D. L., y M. J. Rzasa, *Bibliography for Physical Behavior of Hydrocarbons under Pressure and Related Phenomena*, J. W. Edwards, Inc., Ann Arbor, Mich., 1946.

2. Rollefson, G. K., y R. E. Powell, *Ann Rev. Phys. Chem.*, Annual Reviews, Inc., Stanford, Calif. (anual). Reviews literature on various subjects in physical chemistry.

3. Rose, A., y E. Rose, *Distillation Literature & Abstracts* (1946-52), Applied Science Laboratories, State College, Pa. (1953).

4. Unit Operations Reviews, *Ind. Eng. Chem.* (publicación anual). Reviews work in each unit operation. Many other bibliographies available on special subjects.

B. MANUALES Y REFERENCIAS GENERALES

1. *Beilsteins Handbuch der Organischen Chemie,* Springer-Verlag, Berlin, (4th edition begun in 1914, supplements currently appearing). Latest editions cover literature up to 1929 on well-established organic compounds and reactions; however, it is still primary source of information.

2. Bennett, H., *The Chemical Formulary,* Chemical Publishing Co., Brooklyn, N. Y. (1943). Formulas of many industrial products.

3. *Chemical Economics Handbook,* Stanford Research Institute, Calif. (looseleaf; additional sheets four times per year). Gives financial data on chemical companies, chemical market prices, production and consumption figures.

4. Davis, D. S., *Chemical Engineering Nomographs,* McGraw-Hill Book Co., New York (1944). Collection of various nomographs found useful by Mr. Davis in solving chemical engineering problems.

5. Egloff, Gustav, *The Reactions of Pure Hydrocarbons,* Reinhold Publishing Co., New York (1937).

6. *Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie,* Verlag Chemie, Weinheim (additional volumes appearing currently). Source book of behavior of inorganic compounds. Some sections more recent than Mellor (see below).

*7. Hodgman, C. D., *Handbook of Chemistry & Physics*, 21st Ed., Chemical Rubber Pub. Co., Cleveland (1949).

8. Jacobson, C. A., *Encyclopedia of Chemical Reactions*, Reinhold Publishing Co., New York (1951). Arranged according to elements, four volumes.

9. Josephy, E., y F. Radt, *Elsevier's Encyclopedia of Organic Chemistry*, Elsevier Pub. Co., Houston (1946). Many volumes. They have started with more recent information with the goal of filling in the gap left by Beilstein.

10. Kirk, R. E., y O. F. Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology*, The Interscience Encyclopedia, Inc., New York (1947—).

*11. Lange, N. A., *Handbook of Chemistry*, 8th Ed., Handbook Publishers, Inc., Sandusky, Ohio (1952).

12. *McGraw-Hill Directory of Chemicals & Producers*, McGraw-Hill Publishing Co., Inc., New York (Annual). Lists chemical producers.

13. Mellor, J. W., *A Comprehensive Treatise on Inorganic & Theoretical Chemistry*, Longman's, Green & Company, London. 16 volumes. Handy reference to inorganic chemistry.

14. *Merck Index to Chemicals & Drugs*, 6th Ed., Merck & Co., Inc., Ralway, N. J. (1952). Eight thousand chemicals described.

*15. Perry, John H., *Chemical Engineer's Handbook*, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Co., New York (1950).

16. Rodd, E. H., *Chemistry of Carbon Compounds*, Elsevier Press, Houston (1953).

*17. Furnas, C. C., *Rogers Manual of Industrial Chemistry*, 6th Ed., Van Nostrand Co., New York (1942). Good descriptive information on well-established processes.

*18. Sax, N. I., *Handbook of Dangerous Materials*, Reinhold Publishing Co., New York (1951).

C. COMPILACIONES DE DATOS TERMODINAMICOS, FISICOS Y QUIMICOS

1. Azeotrópica, destilación, equilibrio, y PVT

Chu, Ju Chin, R. J. Getty, L. F. Brennecke, y R. Paul, *Distillation Equilibrium Data*, Reinhold Publishing Co., New York (1950).

Dreisbach, R. R., *Pressure—Volume—Temperature Relationships of Organic Compounds*, 3a. Ed., Handbook Publishers Inc., Sandusky, Ohio (1952).

Horsley, L. H., *Azeotropic Data*, American Chemical Society, Washington, D.C. (1952).

2. Combustibles.

Fuel—flue Gases, American Gas Association, New York (1941).

Gaseous Fuels, American Gas Association, New York (1948).

Spiers, H. M., *Technical Data on Fuel*, 5th Ed., British National Comm., World Power Conference, London (1950). Calorific values, handy charts and tables for many types of fuels.

3. Hidrocarburos

Brooks, B. T., y A. E. Dunstan, *The Science of Petroleum*, Volume 5, Oxford Univ. Press, London (1950). Crude oils: chemical and physical properties.

Brown, G. G., D. L. Katz, G. G. Oberfell, y R. C. Alden, *Natural Gasoline and the Volatile Hydrocarbons*, Natural Gasoline Association of America, Tulsa, Oklahoma (1948).

Egloff, G., *Physical Constants of Hydrocarbons*, Reinhold Publishing Co., New York (1947).

Doss, M. P., *Physical Constants of the Principal Hydrocarbons*, 4a. Ed., The Texas Company, New York (1943).

*Kobe, K. A., *Thermochemistry for the Petrochemical Industry*, *Petroleum Refiner*, Reprint, Gulf Publishing Co., Houston (1951).

*Maxwell, J. B., *Data Book on Hydrocarbons,* D. Van Nostrand Co., Inc., New York (1950).

**Natural Gasoline Supply Men's Association Data Book,* 6a. Ed., Tulsa, Okla. (1951). Data on light hydrocarbons.

*Rossini, F. D., *et al, Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds,* Carnegie Press, Pittsburgh, Pa. (1953).

Sage, B. H., y W. N. Lacey, *Thermodynamic Properties of the Lighter Hydrocarbons and Nitrogen,* American Petroleum Institute, New York (1950).

4. Sustancias químicas (General)

*Dreisbach, R. R., *Physical Properties of Chemical Substances,* Dow Chemical Co., Midland, Michigan (1952).

International Critical Tables of Numerical Data, National Research Council, McGraw-Hill Book Co., New York (1930).

Kobe, K: A., y R. E. Lynn, *The Critical Properties of Elements and Compounds,* Chemical Reviews 52, Feb. 1953 (Reprint).

Landolf—Bornstein Phyiskalisch—Chemische Tabellen, Springer-Verlag, Berlin (1931 and supplements).

*Rossini, F. D., *et al., Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties,* National Bureau of Standards Circular 500, Washington, D. C. (1952).

Otras fuentes: Muchas otras fuentes generales están disponibles. Solicitándola de los diversos fabricantes, se puede obtener literatura de los productos químicos que elaboran. Las monografías de elementos y compuestos específicos, publicadas por la Sociedad Química Americana (American Chemical Society), y que abarcan desde varios metales hasta estireno, glicerol y vidrio, constituyen una valiosa fuente de datos.

5. Cinética

Berkman, S., J. C. Morrell y G. Egloff, *Catalysis,* Reinhold Publishing Co., New York (1940). Good source of data on industrial catalysts of all types.

**Tables of Chemical Kinetics.* Homogeneous Reactions, Circular No. 510 of the National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1951).

6. Solubilidades

Seidell, A., *Solubilities of Inorganic & Organic Compounds,* 3a. Ed., Vol. I, II, & Supplements, Van Nostrand Co., New York (1941-52).

Hildebrand, J. H., y R. L. Scott, *The Solubility of Nonelectrolytes,* 3a. Ed., Reinhold Publishing Co., New York (1950).

7. Solventes

Mellan, I., *Industrial solvents,* Reinhold Publishing Co., New York (1950).

8. Conductividad térmica

Sakiadis, B. C. y J. Coates, *A Literature Survey of the Thermal Conductivity of Liquids,* Eng. Exp. Station Bulletin No. 34, Louisiana State Univ., Baton Rouge. La. (1952).

Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association, 3a. Ed., TEMA, Inc., New York (1952).

9. Varios

Kennan, J. H., y J. Kaye, *Gas Tables,* John Wiley & Sons, Inc., New York (1945).

Kennan, J. H., y J. Kaye, *Thermodynamic Properties of Air,* John Wiley & Sons, Inc., New York (1945).

*Kennan, J. H., y F. G. Keyes, *Thermodynamic Properties of Steam.* John Wiley & Sons, Inc., New York (1936).

Properties of Commonly Used Refrigerants, Air Conditioning and Refrigerating Machinery Association, Washington, D.C. (1946).

Zimmerman, D. T., y I. Lavine, *Psychrometric Tables & Charts,* Industrial Research Service, Dover, New Hampshire (1945).

D. MATERIALES

1. Everhart, J. L., *et al.*, *Mechanical Properties of Metals & Alloys*, Bureau of Standards Cir. C447, Washington, D. C. (1943).
2. DuMond, T. C., *Engineering Materials Manual*, Reinhold Publishing Co., New York (1951). Generalized and in simple terms.
3. Rabald, E., *Corrosion Guide*, Elsevier Publishing Co., Houston (1951). Handy tables of corrosion resistant material recommendations.
4. Simonds, H. R., A. J. Weith, y M. H. Bigelow, *Handbook of Plastics*, 2a. Ed., Van Nostrand, New York (1949).
5. *Technical Data on Plastics*, Manufacturing Chemists Assoc., Washington, D.C. (1952). Properties and Manufacturers.

La posesión de los mejores datos técnicos y conocimientos teóricos para el diseño de todos los tipos de equipo de proceso, representa únicamente una parte de los requisitos de una ingeniería de proceso exitosa. El ingeniero de proceso debe también tener un conocimiento práctico de operación de equipo y de diseño mecánico, logrado a través de experiencia real o al menos por observación de la operación. No es raro que un ingeniero que carezca de estos antecedentes dimensione el equipo de tal manera que resulte impráctica su construcción y operación. Quienes trabajan en diseño mecánico de equipo se resisten a poner en duda o alterar el diseño de proceso, ya que en ocasiones suelen requerirse ciertas distribuciones del proceso. Por consiguiente, en el diseño final de la planta podría llegar a emplearse, sin ser objetado, un diseño impráctico iniciado por el ingeniero de proceso. Así que es necesario que el ingeniero de proyecto esté al pendiente de todos los diseños de proceso imprácticos. Su experiencia en diseño, tanto en las fases mecánicas como de proceso, lo hacen inusitadamente calificado para este trabajo, y como director del proyecto ciertamente ésa es su tarea principal.

REFERENCIAS

1. Chilton, C. H., *Chem. Eng.*, 56, No. 6, 97 (1949).
2. Dybdal, E. C., *Chem. Eng. Progr.*, 46, 57 (1950).
3. Harris, J. McA., Jr., *Chem Eng. Progr.*, 44, 333 (1948).
4. Hougen, O. A, y K. M. Watson, *Chemical Process Principles*, Vol. III, John Wiley & Sons, New York, 1947.
5. Long, H. J., *Chem Eng.*, 55, No. 6, 112 (1948).
6. Nichols, W. T., *Ind Eng. Chem.*, 43, 2295 (1951).
7. "Process Equipment Estimation," Report *Chem. Eng.*, 54, No. 5, 103 (1947).
8. Stevens, R. Q., *Chem. Eng.*, 54, No. 10, 124 (1947).
9. Williams, R., Jr., *Chem. Eng.*, 54, No. 12, 124 (1947).
10. Zimmerman, O. T. y Lavine, *Chemical Engineering Equipment Costs*, Industrial Research Service, Dover, New Hampshire, 1950.

CAPITULO 5

DIAGRAMAS DE FLUJO

Para el ingeniero químico es importante poder usar el balance de materiales y energía y el diagrama de flujo en la resolución de problemas de diseño y operación. Así como el balance económico y el estado de resultados permiten al contador resolver complejos problemas financieros, el balance de materiales y energía, junto con el diagrama de flujo de un proceso, ayudan al ingeniero químico a visualizar y resolver sus problemas de una manera rápida y directa.

Bosquejar un diagrama de flujo es una manipulación casi instintiva para el ingeniero químico experimentado. Es una parte de su proceso mental así como de su técnica explicativa. Esto es lo que normalmente constituye un bosquejo o diagrama esquemático de flujo. En el diseño y construcción de una planta, un diagrama de flujo más completo, llamado diagrama de ingeniería de flujo, se convierte en el engrane vital para transmitir la información de proceso a todos los departamentos de un grupo de ingeniería de diseño.

DIAGRAMAS ESQUEMATICOS DE FLUJO

Parece aconsejable sugerir el menor número de reglas a seguir en la elaboración de diagramas esquemáticos. Por naturaleza deben ser individualísticos, ya que se usan para propósitos muy variados. Cuando se emplean para explicar un proceso o modo de operación a un colega, a un superior, o a un cliente, la originalidad proporciona con frecuencia el énfasis necesario. La claridad, sin embargo, nunca debe ser sacrificada, y para asegurar esta claridad el auditorio debe ser tenido en cuenta.

Existen tres tipos de diagramas esquemáticos en uso general:

1. Diagrama de cuadros
2. Diagrama de flujo de proceso
3. Diagrama gráfico de flujo

Diagrama de cuadros

El diagrama de cuadros es el más simple, pero menos descriptivo de los diagramas esquemáticos. Como su nombre lo indica, consiste de cuadros que por lo general representan una sola operación unitaria en una planta o bien toda una sección de la planta. Estos cuadros están conectados por flechas que indican la secuencia del flujo. En la Fig. 5-1 se muestra uno de tales diagramas.

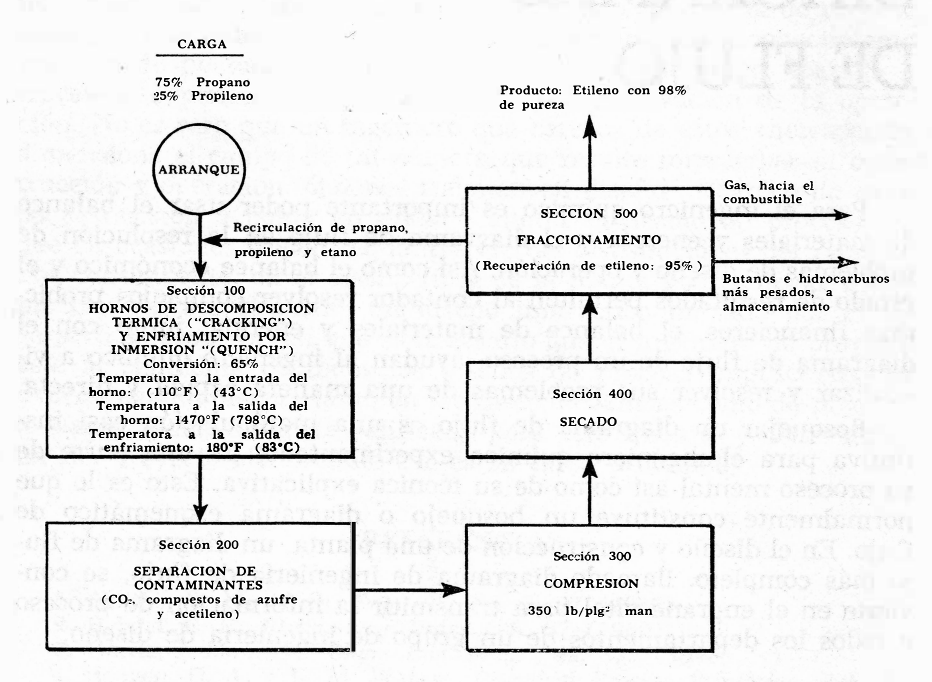


FIG. 5-1. Diagrama de cuadros para una planta de etileno

El diagrama de cuadros es en extremo útil en las etapas iniciales de un estudio de proceso y es particularmente valioso para presentar los resultados de estudios económicos u operaciones, ya que dentro de los cuadros pueden colocarse los datos significativos.

Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo de proceso, tal como se ilustra en la Fig. 5-2, es utilizado con mayor frecuencia por el ingeniero de proceso en

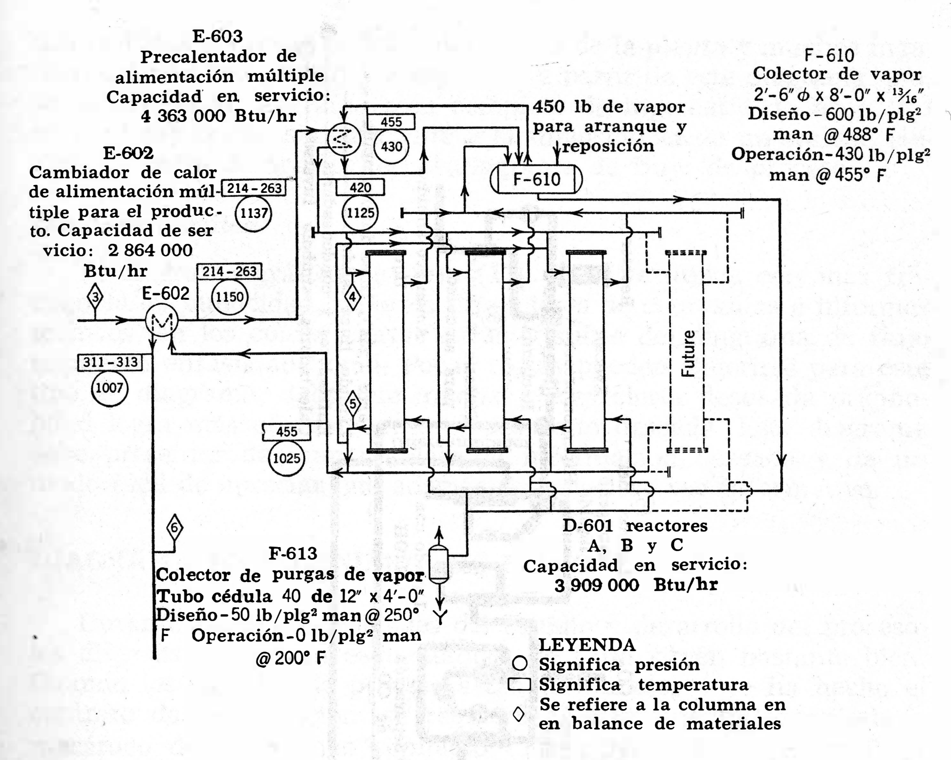


FIG. 5-2. Diagrama de flujo de proceso: sección de reactores de la unidad de polimerización. (Cortesía de Foster Wheeler Corporation.)

trabajos de diseño y en estudios de proceso. Debe estar dibujado de manera que el flujo y las operaciones del proceso destaquen de inmediato. Esto se logra omitiendo todo excepto los detalles esenciales, utilizando frecuentes flechas para indicar la dirección del flujo, empleando líneas más gruesas para las líneas principales de flujo, e indicando temperaturas, presiones y cantidades de flujo en diversos puntos significativos del diagrama. Se presentan ciertos datos pertinentes del diseño de proceso, tales como la capacidad en servicio de cambiadores de calor, datos de diseño de recipientes, y requerimientos especiales como las elevaciones requeridas de ciertos equipos.

Como se muestra en la Fig. 5-2, a menudo se usan símbolos convencionales para renglones estándar de equipo, tales como bombas y cambiadores de calor. Excepto cuando se necesitan para darle claridad al proceso, las válvulas, líneas de servicio y partes de repuesto de equipo se omiten. Unicamente se ilustran instrumentos esenciales al control del proceso.

Los principales criterios para un buen diagrama de flujo de proceso son la claridad, la exactitud y la utilidad. Este diagrama se

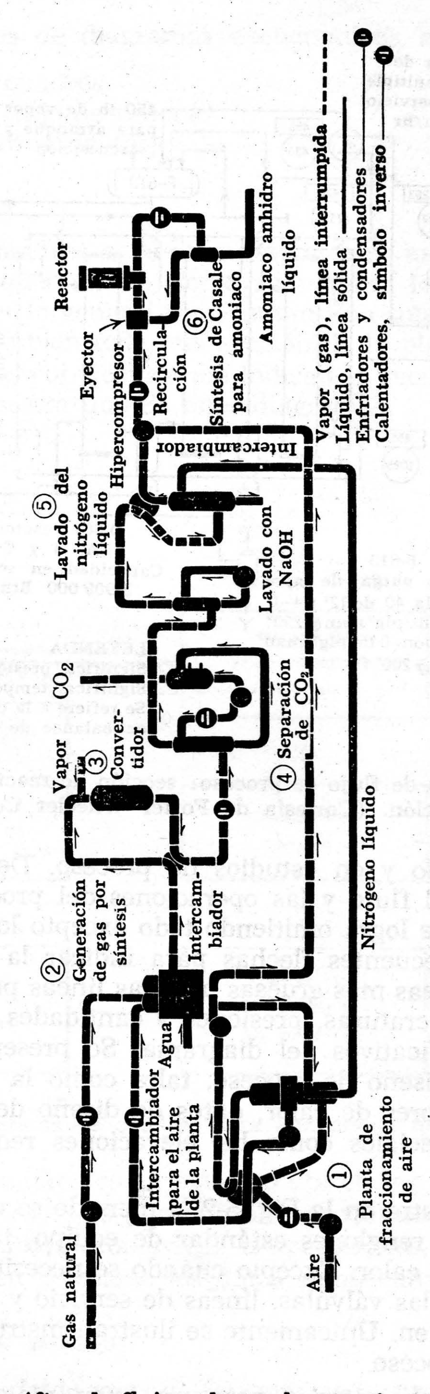


Fig. 5-3. Diagrama gráfico de flujo: planta de amoniaco. (Cortesía de Foster Wheeler Corporation.)

usa en todas las fases iniciales del diseño de la planta y muchos ingenieros deben verlo y comprenderlo. Es a partir de este diagrama que, se desarrolla el diagrama más completo de ingeniería de flujo. No es fácil dar el énfasis suficiente a la importancia de un trabajo cuidadoso, como de artífice, en el diagrama de flujo de proceso.

Diagrama gráfico

El diagrama gráfico de flujo (Fig. 5-3) se utiliza con más frecuencia en publicidad, reportes financieros de compañías e informes técnicos, en los cuales ciertas características del diagrama de flujo requieren énfasis adicional. Pocas reglas pueden sugerirse para este tipo de diagrama, dado que muchas veces cierta desusada originalidad logra más efectivamente el propósito deseado. Este diagrama debe presentar de manera clara la información deseada y de un modo fácil de apreciar que además de novedoso sea informativo.

DIAGRAMA DE INGENIERIA DE FLUJO

Durante las etapas iniciales del estudio y desarrollo del proceso, los diversos diagramas esquemáticos de flujo sirven bastante bien. Cuando los cálculos de proceso están terminados y se ha hecho el contrato de construcción, se requiere el diagrama de ingeniería o mecánico de flujo, más completo (Figs. 5-4 y 5-5) (entre Págs. 96-97).

Para comprender lo que se necesita en este diagrama, se debe entender su uso. En un bufete de ingeniería el diagrama de flujo es la fuente central de información para todos los grupos de diseño. Estos grupos incluyen diseñadores en los aspectos eléctricos, de tubería, estructuras, instrumentos, y bombas y compresoras. Dicho diagrama sirve como un lugar común de reunión para los ingenieros de diseño y los ejecutivos. Dado que tantas personas de diferentes disciplinas se deben referir a él, la estandarización es esencial con objeto de evitar confusiones innecesarias. Ninguna información importante debe ser omitida ni información inútil alguna debe ser incluida.

Equipo de proceso

En el diagrama de ingeniería de flujo se muestran todos los renglones de equipo de proceso, incluyendo los de repuesto. Los apuntes diagramáticos se hacen a modo de asemejarse lo más posible al equipo, ayudando así a la visualización de los equipos individuales por parte de todos los usuarios del diagrama. Por lo general se emplean vistas sencillas de elevación, pero alteradas de tal modo que todas las conexiones aparezcan sobre el plano del diagrama Este procedimiento se sigue por su simplicidad. Las boquillas se localizan en la posición relativa apropiada es decir, en el plan apropiado en

una columna de fraccionamiento. No es práctico hacer estos diagramas a escala, puesto que los equipos más pequeños serían reducidos a tamaños indebidos. Sin embargo, se recomienda conservar una cierta proporción en las diferencias relativas de tamaños, lo cual a veces se puede lograr utilizando diferente escala en lo horizontal que en lo vertical.

En atención a que el equipo varía considerablemente, no es posible tener apuntes diagramáticos estándar para cada renglón individual. No obstante, las representaciones de bombas, motores y turbinas pueden ser estandarizadas como en la Fig. 5-5.

Notaciones

Adyacente a cada renglón de equipo se debe proporcionar cierta información esencial. Estas notaciones deben suministrar de una manera concisa los datos requeridos por cada usuario del diagrama. La experiencia ha dictado la información que requieren ciertos renglones comunes de equipo como bombas y recipientes. Para equipo especial, con frecuencia se dan las dimensiones globales y las principales características de operación. Se han sugerido las siguientes notaciones:

TABLA 5-1. DESIGNACIONES DE EQUIPO TIPICO

Compresoras	K, C
Intercambiadores	E, C (para condensadores) y RB (para rehervidor)
Calentadores	H
Bombas	P o PU
Reactores	R
Tanques de almacenamiento	ST
Torres	T
Recipientes	V

Empero, cualquier sistema consistente puede ser satisfactorio.

Numeración individual

A todas las unidades del equipo se les debe asignar un número individual que debe aparecer sobre o junto al equipo de que se trate. Si el sistema de numeración individual se planea con cuidado, ayuda en forma inconmensurable en el uso del diagrama de flujo y en la ejecución de todas las fases del trabajo de diseño y construcción. Un sistema típico que ha sido empleado con éxito en casos en donde la unidad de proceso está dividida en áreas o secciones, utiliza una clave, como, por ejemplo, P-101. La letra indica el tipo de equipo, en este caso una bomba; el 101 indica que la bomba es la número

uno en el área 100. Si esta bomba tiene un repuesto idéntico, éste puede denominarse P-101A. En la Tabla 5-1 se proporcionan designaciones comunes, a base de letras para diversos equipos.

Información de proceso

También debe proporcionarse una lista con información importante sobre el proceso. Las siguientes son sugerencias importantes para diversos renglones comunes de equipo.

Recipientes

Servicio
Diámetro, altura, espesor
Características especiales (revestimientos, etc.)
Condiciones de diseño
Condiciones de operación

Intercambiadores de calor

Servicio
Presión diferencial a través del casco y de los tubos
Area de transmisión de calor
Capacidad en servicio, en Btu/hr
Condiciones de diseño
Temperatura y presión a la entrada y a la salida

Bombas

(Esta información puede ser proporcionada en el diagrama de flujo o en anexos adecuados.)

Servicio
Tamaño y tipo
Fluido
Temperatura de la bomba
Densidad a la temperatura de la bomba
Gal/min (GPM) de diseño a la temperatura de la bomba
Diferencial de diseño
NPSH (Cabezal neto positivo de succión)

Compresoras

(Esta información puede ser proporcionada en el diagrama de flujo o en anexos adecuados.)

Servicio
Número de pasos
Condiciones de succión
Succión en el primer paso

Succión en el segundo paso
Descarga en el segundo paso
BHP (Potencia al freno) en el primer paso
BHP en el segundo paso
Capacidad SCFM (Pies cúbicos estándar por minuto).

Tubería y válvulas

En los diagramas de ingeniería de flujo se muestran todas las líneas de proceso y líneas de servicios para el equipo de proceso. A menudo las líneas del proceso principal se dibujan más gruesas a manera de que la secuencia del flujo primario sea más evidente.

TABLA 5-2. SIMBOLOS TIPICOS DE VALVULAS Y TUBERIAS PARA DIAGRAMAS DE FLUJO

PIEZA	SIMBOLO
Válvulas y accesorios	
Válvulas de ángulo	
Brida ciega	
Válvula de retención	
Brida en 8	
Brida	
Válvula de compuerta	
Válvula de globo	
Conexión de manguera	
Llave de macho	
Reductor	or
Coladera	

Designaciones para las líneas	
Proceso principal	
Proceso secundario	
Aire	—//—//—
Condensado	
Drenaje	
Vapor	
Rastreada con vapor	
Agua	

Nota: En los diagramas de flujo, generalmente no se hace distinción entre conexiones de brida o de rosca. La especificación de tubería, anotada en el número de designación de la línea, proporciona esta información.

Las líneas de servicios se dibujan usando varios símbolos (Tabla 5-2) para permitir una fácil diferenciación de los diversos servicios. Las flechas se usan siempre que sea necesario para ayudar a seguir el flujo. Todas las válvulas se indican, incluyendo las de retención, pero las bridas y los accesorios no se muestran, excepto en el equipo. En la Tabla 5-2 se presentan los símbolos comunes para las válvulas de uso general. Tamaños de válvulas diferentes al de la línea se muestran adyacentes a la válvula.

Dado que el diseñador de tuberías utiliza el diagrama de flujo como su principal fuente de información, muchos datos deben ser proporcionados en el diagrama. Se deben suministrar temperaturas y presiones, flujos y descripción de los fluidos. Además, deben darse

las especificaciones para las líneas a modo de que para cada línea también se conozcan el tamaño, material y espesor de tubería, clase de bridas y capacidad normal de válvulas y accesorios. Esta información puede ser convenientemente proporcionada por medio de un sistema de numeración de líneas, en el cual cada línea que va desde un equipo a otro tiene un número individual.

Estos números pueden registrarse en las mismas formas en que se registra el flujo, presión, temperatura y fluido. Siempre que el tamaño o la especificación de la línea cambian, el número de la línea también cambia. Para evitar confusiones, cuando una línea se cancela se elimina un número de línea. El número de línea puede incluir la designación del área. Un sistema típico emplea un número tal como 3″06403E (Fig. 5-4).

3″	0	6
Tamaño de línea	Clase de fluido	Número de área

403	E
Número de línea	Espec. de tubería

En vista de que, como se explica en el Cap. 18, las especificaciones de tubería se escriben en detalle para cada clase de servicio, el diseñador de tuberías puede obtener del diagrama de flujo toda la información requerida para distribuir y diseñar la tubería, así como también la lista de líneas y las especificaciones de tuberías. Estos números de línea sirven, además, para el marcado e identificación de la tubería fabricada en taller. Por consiguiente, un diagrama de flujo pobremente numerado puede causar grandes confusiones en todo el proyecto.

En el diagrama de flujo las válvulas se identifican tanto por número como por símbolo. Los números se refieren a las especificaciones detalladas de las válvulas y son muy útiles lo mismo a los diseñadores que a las personas encargadas de las adquisiciones de materiales. Aunque algunas organizaciones no numeran las válvulas en sus diagramas de flujo, la mayoría utilizan números en sus planos de tuberías.

Instrumentación

En el diagrama de flujo debe mostrarse toda la instrumentación para el control, registro e indicación de la operación de la planta. Por lo general, el ingeniero de proceso indica de manera esquemática la instrumentación en el diagrama de flujo de proceso. Posteriormente este diagrama se "ingenieriza" y se adiciona al diagrama de ingeniería de flujo con toda la otra instrumentación requerida.

La Sociedad Norteamericana de Instrumentos (The Instrument Society of America) ha preparado un conjunto de símbolos estándar para instrumentos, los cuales deben ser observados para evitar con-

fusiones. Dichos símbolos se reproducen en la Tabla 5-3. Por lo general en el símbolo se incluye el número de instrumento, tal como se muestra en la tabulación. Para ayudar en el diseño de la tubería, los tamaños de las válvulas de control y de las válvulas de alivio deben aparecer junto a ellas.

Arreglo del diagrama

Un arreglo bien planeado del diagrama de ingeniería de flujo, puede contribuir bastante a asegurar una eficiente y alta calidad de mano de obra en todas las etapas del trabajo. Si cuando se dibuja el diagrama de flujo se tiene cierta idea del plano real de la distribución de la planta, es muy útil arreglar el diagrama de manera similar, en la medida de lo práctico. Dicho arreglo ayuda al personal de distribución de equipo y a los diseñadores de tubería a visualizar la planta más rápidamente y evita el sobreacentamiento de una línea que en realidad puede ser bastante corta, pero que aparece larga debido al arreglo del diagrama de flujo.

Existen muchos métodos de lograr un buen arreglo. Las bombas pueden ser colocadas debajo del otro equipo, como se muestra en la Fig. 5-5, o bien todo el equipo puede estar arreglado sobre una misma línea base. Las líneas de proceso pueden mostrarse en un plano y las líneas de servicio en otro. O ambas líneas, las de proceso y servicio, pueden ser mostradas en un solo plano. Sin embargo, esto a menudo produce una aglomeración excesiva, especialmente si hay demasiadas conexiones de servicio, como acontece en las instalaciones de compresoras grandes.

El diagrama de flujo, para ser leído y entendido con facilidad, no debe estar aglomerado. Para representar un proceso, con frecuencia se necesitan varios planos por separado. Las líneas que pasan del equipo de una hoja al de otra, se mantienen a una misma altura a modo de que la continuación de la línea en la siguiente hoja pueda ser encontrada con facilidad.

INFORMACION CONFIDENCIAL

Debido a lo completo que resultan, los diagramas de flujo de proceso, los diagramas de ingeniería de flujo y, algunas veces, los diagramas de cuadros contienen información confidencial. Nunca deben ser distribuidos libremente, ni su reproducción debe ser permitida por personas desautorizadas. Si se permite que individuos sin escrúpulos copien un diagrama de flujo, ellos pueden obtener una ventaja desleal ya que están evitando el tiempo, esfuerzo y gastos requeridos para producir un diagrama completo de flujo. Dicha práctica viola todos los códigos de ética conocidos.

TABLA 5-3 (1). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

SIMBOLOS DE INSTRUMENTACION BASICA

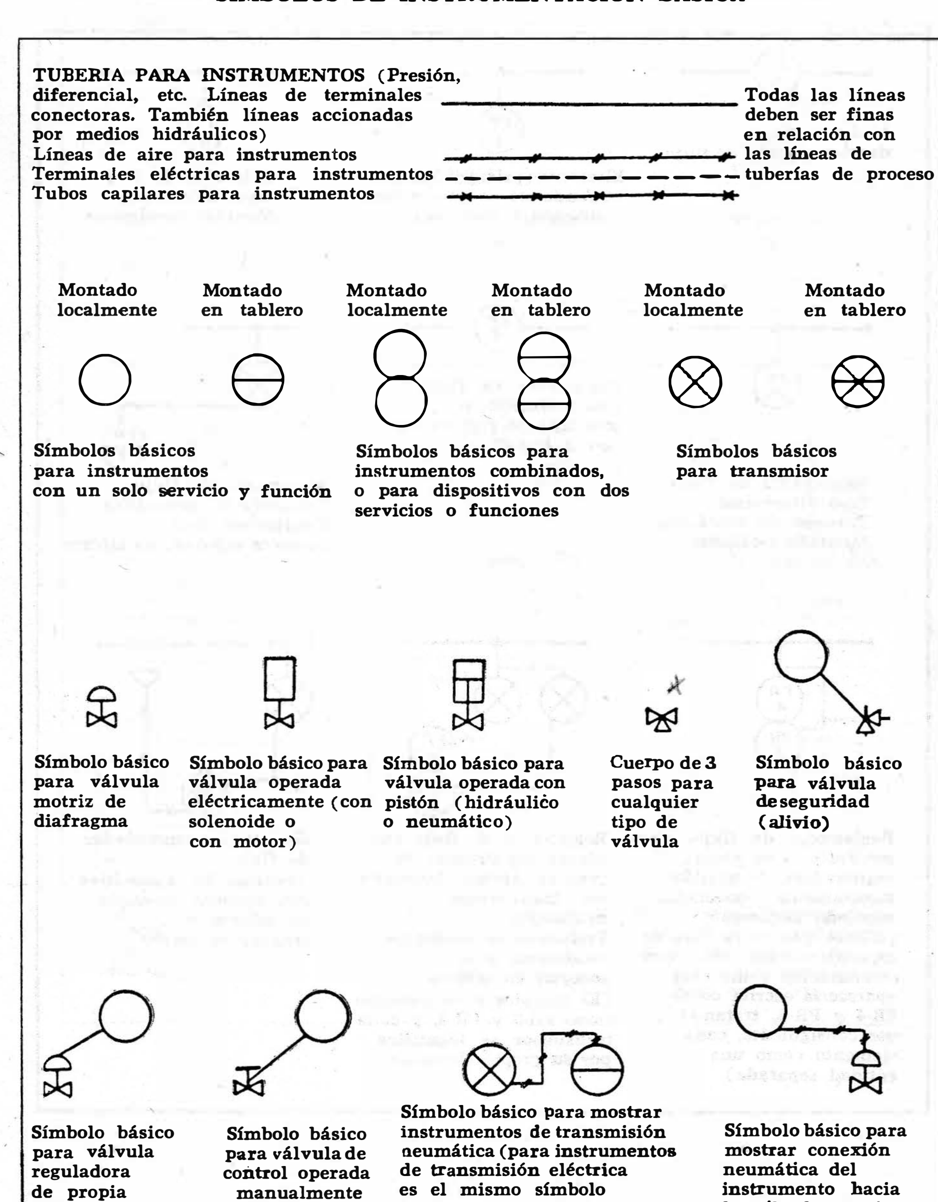


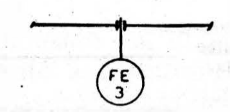
TABLA 5-3 (2). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

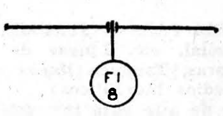
SIMBOLOS TIPICOS DE INTRUMENTACION PARA FLUJO



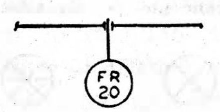
Medidor, tipo desplazamiento, de flujo



Elemento (primario) de flujo (Cuando no se proporciona instrumento medidor)



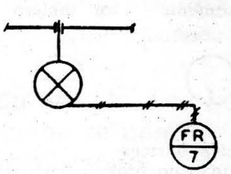
Indicador de flujo
Tipo diferencial
Montado localmente



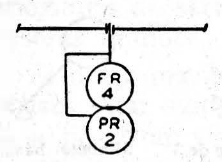
Registrador de flujo
Tipo diferencial
Transmisión mecánica
Montado localmente

FR 7

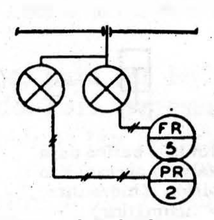
Registrador de flujo tipo rotámetro, u otro tipo de registrador "en la linea"



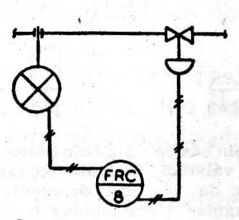
Registrador de flujo
Transmisión neumática
Transmisor local
Receptor montado en tablero



Registrador de flujo, tipo mecánico, con pluma registradora de presión directamente conectada, montado localmente (Nótese que en la lista de especificaciones, etc., una combinación como ésta aparecería escrita como FR-4 y PR-2, tratando, por consiguiente, cada elemento como una entidad separada)



Registrador de flujo con pluma registradora de presión. Ambos elementos con transmisión neumática
Transmisores montados localmente y el receptor en tablero
(El receptor debe anotarse como FR-5 y PR-2, y cada transmisor se identifica por su propio elemento)



Registrador controlador de flujo.
Transmisión neumática con receptor montado en tablero y transmisor local

TABLA 5-3 (3). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

SIMBOLOS TIPICOS DE INSTRUMENTACION PARA TEMPERATURA

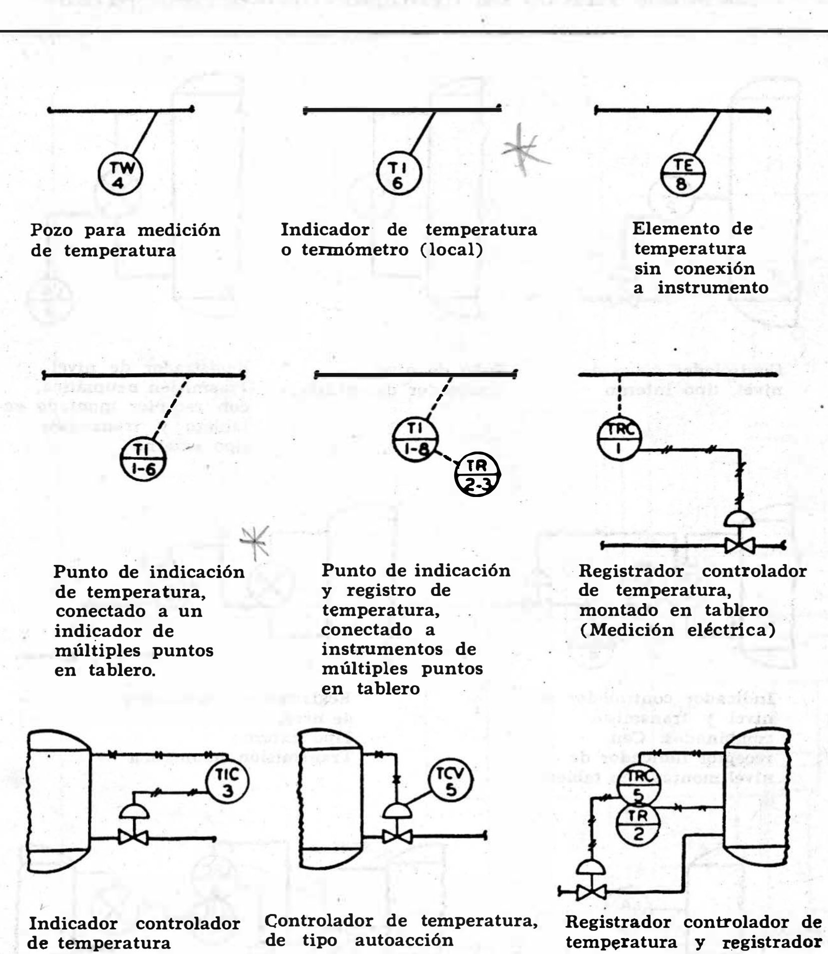
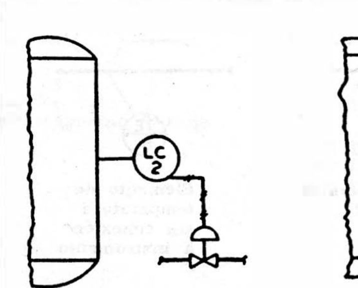


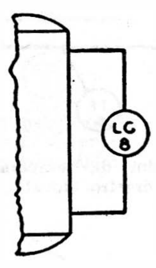
TABLA 5-3 (4). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

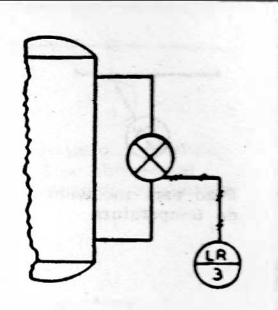
SIMBOLOS TIPICOS DE INTRUMENTACION PARA NIVEL



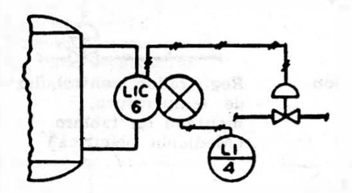
Controlador ciego de nivel, tipo interno



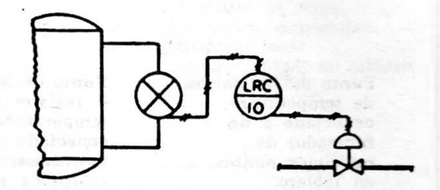
Tubo de nivel (indicador de mirilla)



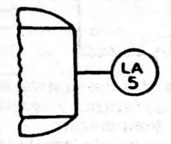
Registrador de nivel
Trasmisión neumática, con receptor montado en tablero y transmisor tipo externo



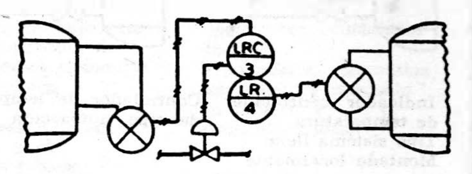
Indicador controlador de nivel y transmisor combinados. Con receptor indicador de nivel montado en tablero



Registrador controlador de nivel
Tipo externo
Transmisión neumática



Alarma de nivel
Tipo interno



Registrador controlador de nivel y registrador de nivel
Transmisión neumática
Receptor combinado montado en tablero

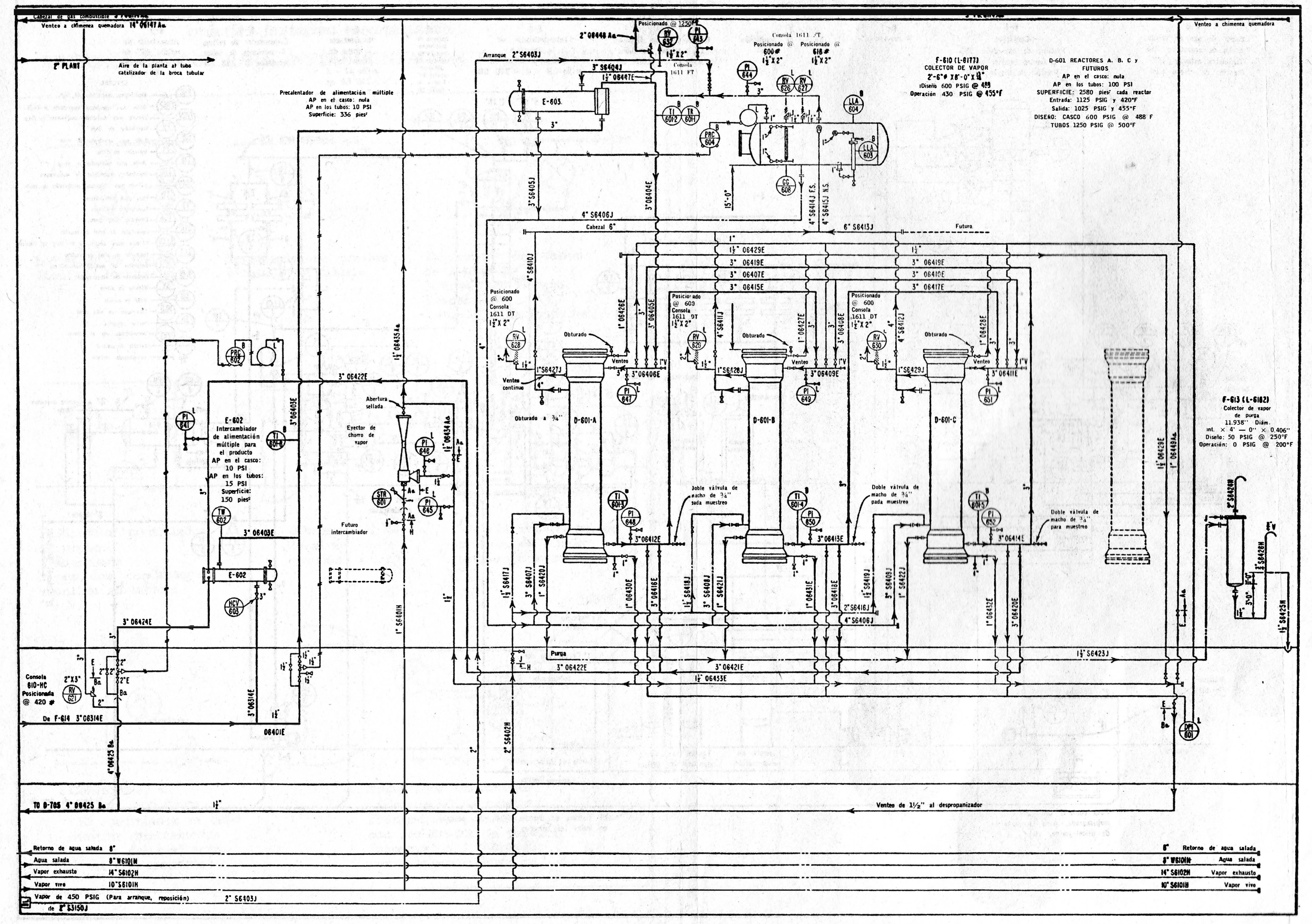


FIG. 5-4. Diagrama de ingeniería de flujo: sección de reactores de unidad de polimerización. (Cortesía de Foster Wheeler Corporation.)

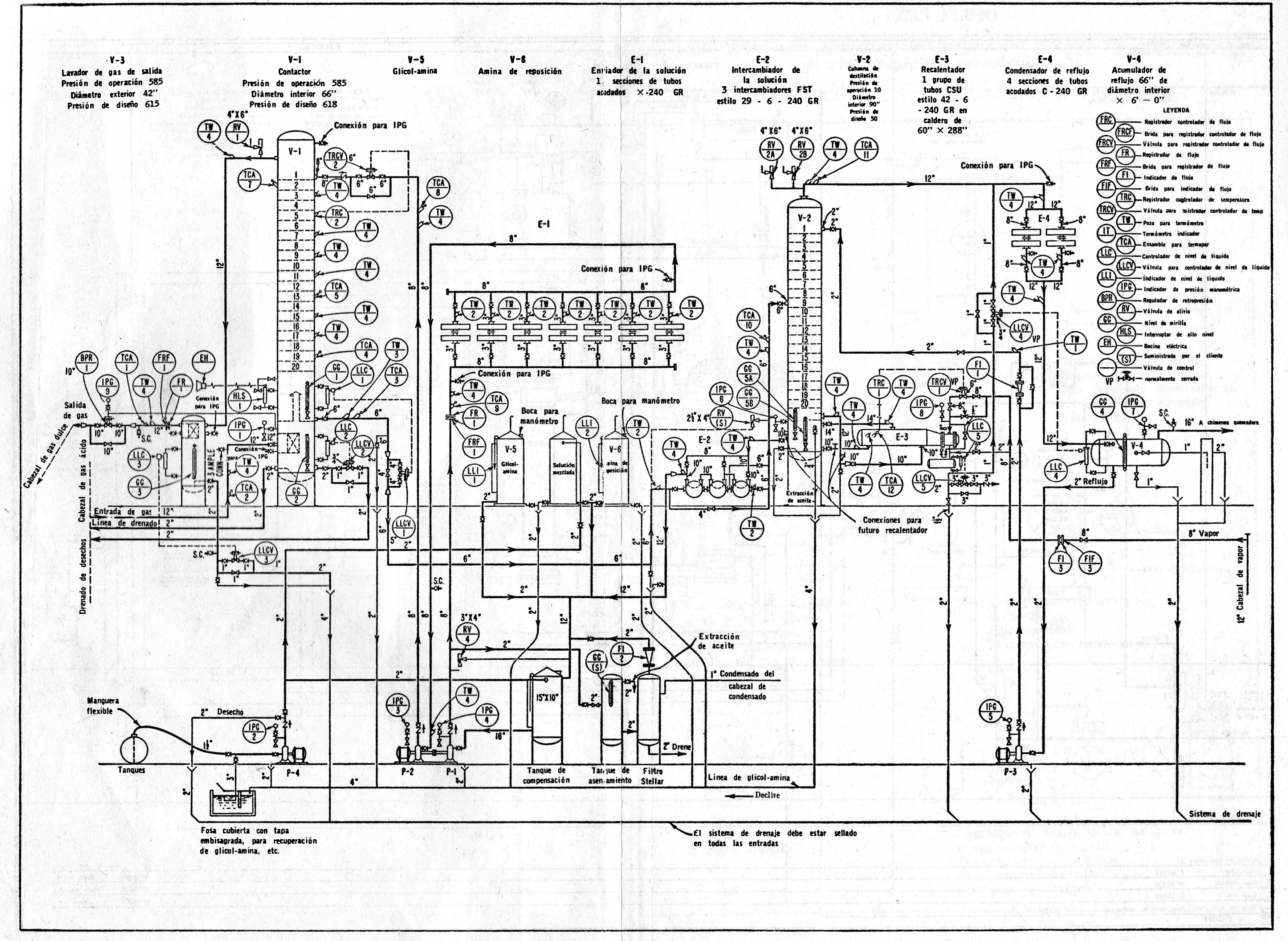
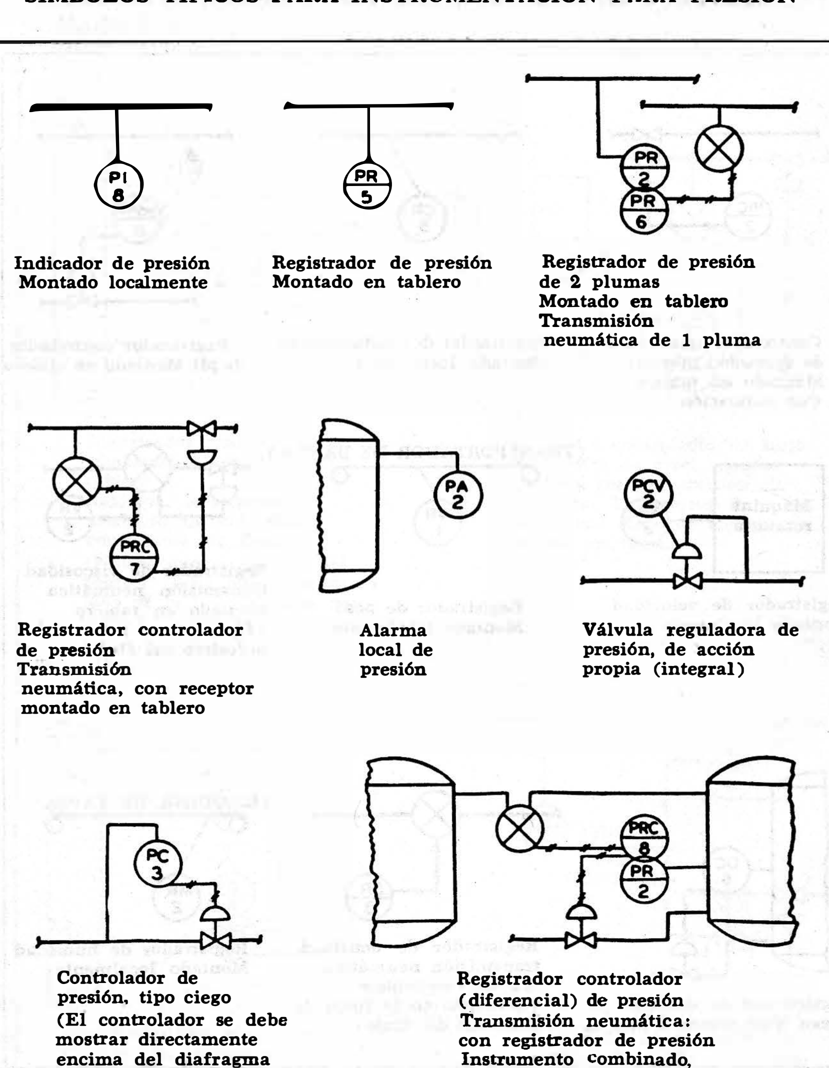


FIG. 5-5. Diagrama de ingeniería de flujo: planta de tratamiento de gas. (Cortesía de Fluor Corporation.) Este es un típico diagrama de flujo en la etapa de desarrollo. Aún no se habían asignado números a las líneas.

TABLA 5-3 (5). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

SIMBOLOS TIPICOS PARA INSTRUMENTACION PARA PRESION



Indicador de presión Montado localmente

Registrador de presión Montado en tablero

Registrador de presión de 2 plumas Montado en tablero Transmisión neumática de 1 pluma

Registrador controlador de presión Transmisión neumática, con receptor montado en tablero

Alarma local de presión

Válvula reguladora de presión, de acción propia (integral)

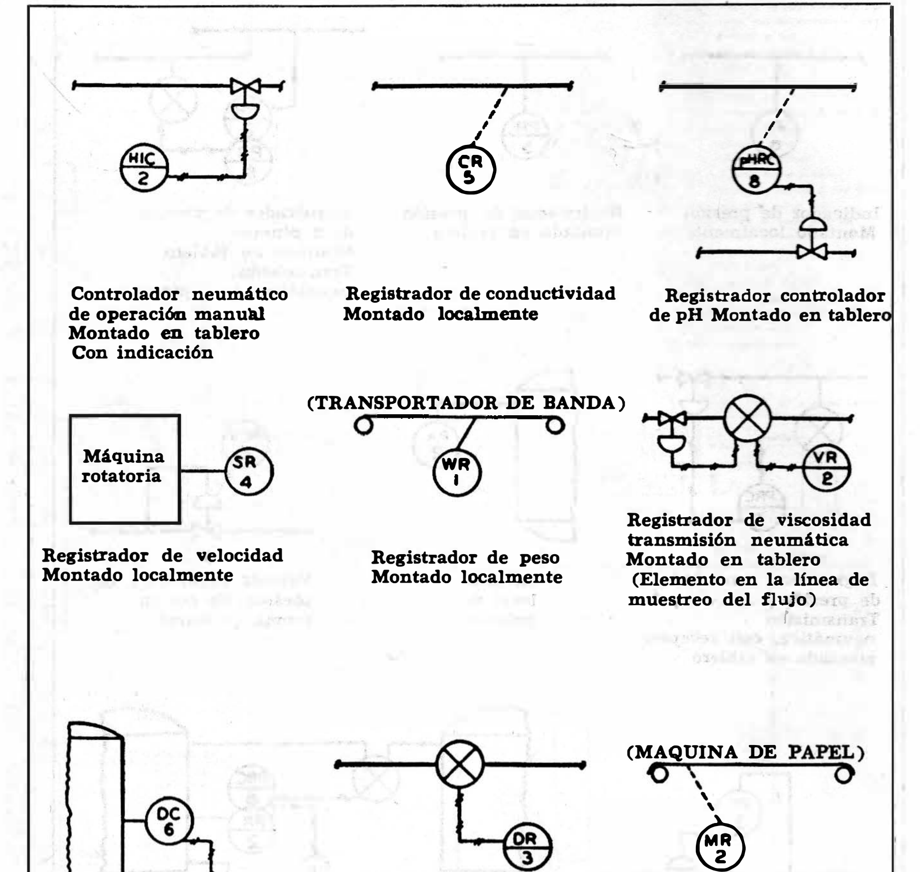
Controlador de presión, tipo ciego (El controlador se debe mostrar directamente encima del diafragma si así está montado)

Registrador controlador (diferencial) de presión Transmisión neumática: con registrador de presión Instrumento combinado, montado en tablero

TABLA 5-3 (6). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

SIMBOLOS TIPICOS DE INSTRUMENTACION (DIVERSOS)



Controlador neumático de operación manual Montado en tablero Con indicación

Registrador de conductividad Montado localmente

Registrador controlador de pH Montado en tablero

Registrador de velocidad Montado localmente

Registrador de peso Montado localmente

Registrador de viscosidad transmisión neumática Montado en tablero (Elemento en la línea de muestreo del flujo)

Controlador de densidad. Ciego. Tipo elemento interno

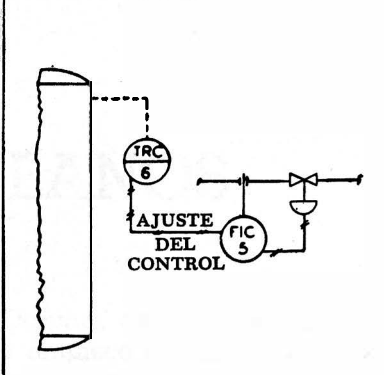
Registrador de densidad transmisión neumática Montado en tablero (Elemento en la línea de muestreo del flujo)

Registrador de humedad Montado localmente

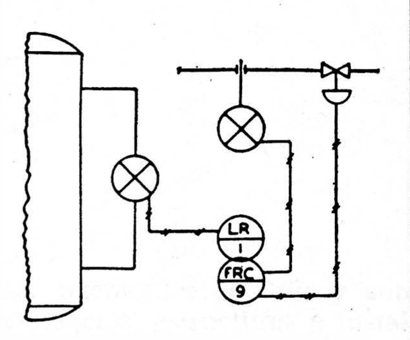
TABLA 5-3 (7). SIMBOLOS DEL PLANO DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO

(Reimpresa con autorización, Instrument Society of America, *práctica tentativa recomendada*)

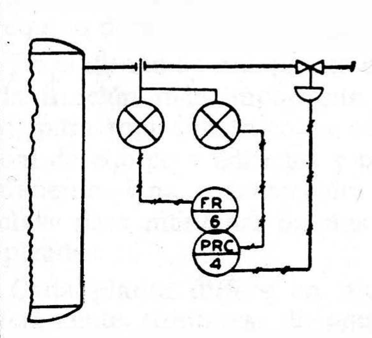
SIMBOLOS TIPICOS DE INSTRUMENTACION PARA INSTRUMENTOS COMBINADOS



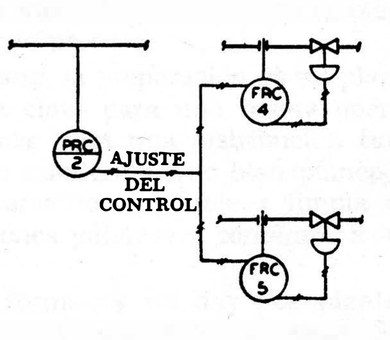
Registrador controlador de temperatura, montado en tablero
Reajuste, localmente montado, de indicador controlador de flujo.
(Nótese que el "Ajuste del control" debe mostrarse a un lado de la línea de aire para indicar control en cascada)



Registrador controlador de flujo con registro de nivel. Ambos elementos con transmisión neumática. Transmisor de nivel, tipo externo. Receptor combinado, montado en tablero.



Registrador controlador de presión con registro de flujo. Ambos elementos con transmisión neumática. Receptor combinado, montado en tablero



Registrador controlador de presión. Montado en tablero. Reajuste, localmente montado, de registradores controladores de flujo

CAPITULO 6

PLANOS

Después de terminar los diagramas ingenieriles de flujo y antes que empiece el diseño detallado de conductos, estructuras e instalaciones eléctricas, debe planearse la distribución de las unidades de proceso en la planta, así como el equipo dentro de estas unidades de proceso. Esta planeación se realiza por un grupo de expertos, incluyendo al ingeniero de proyecto, a los diseñadores estructurales y de conductos y al ingeniero de proceso. Los resultados de sus trabajos son los planos: el plano maestro de conjunto y los planos unitarios. El plano maestro de conjunto (Fig. 6-1) muestra la localización de cada unidad de proceso, calles y edificios. El plano unitario (Fig. 6-2) muestra la localización en vista de planta de cada pieza de equipo dentro de una sola unidad de proceso.

En el diseño de una planta de proceso, la preparación de un plano es la función más importante. Es la clave para una buena operación, para una construcción económica, para una distribución funcional de equipo y edificios y para un mantenimiento bien planeado y eficiente. Una construcción estéticamente agradable y limpia es la clave para mantener buenas relaciones públicas y contentos a los empleados.

Cada planta difiere en muchas formas y no hay dos plantas exactamente similares; de aquí que no exista un plano ideal. Sin embargo, es posible describir algunas de las reglas más importantes que aseguran una distribución satisfactoria.

PLANO MAESTRO DE CONJUNTO

La Fig. 6-1 es un diagrama de un plano maestro de conjunto. Con objeto de lograr una mayor claridad se han omitido las dimen-

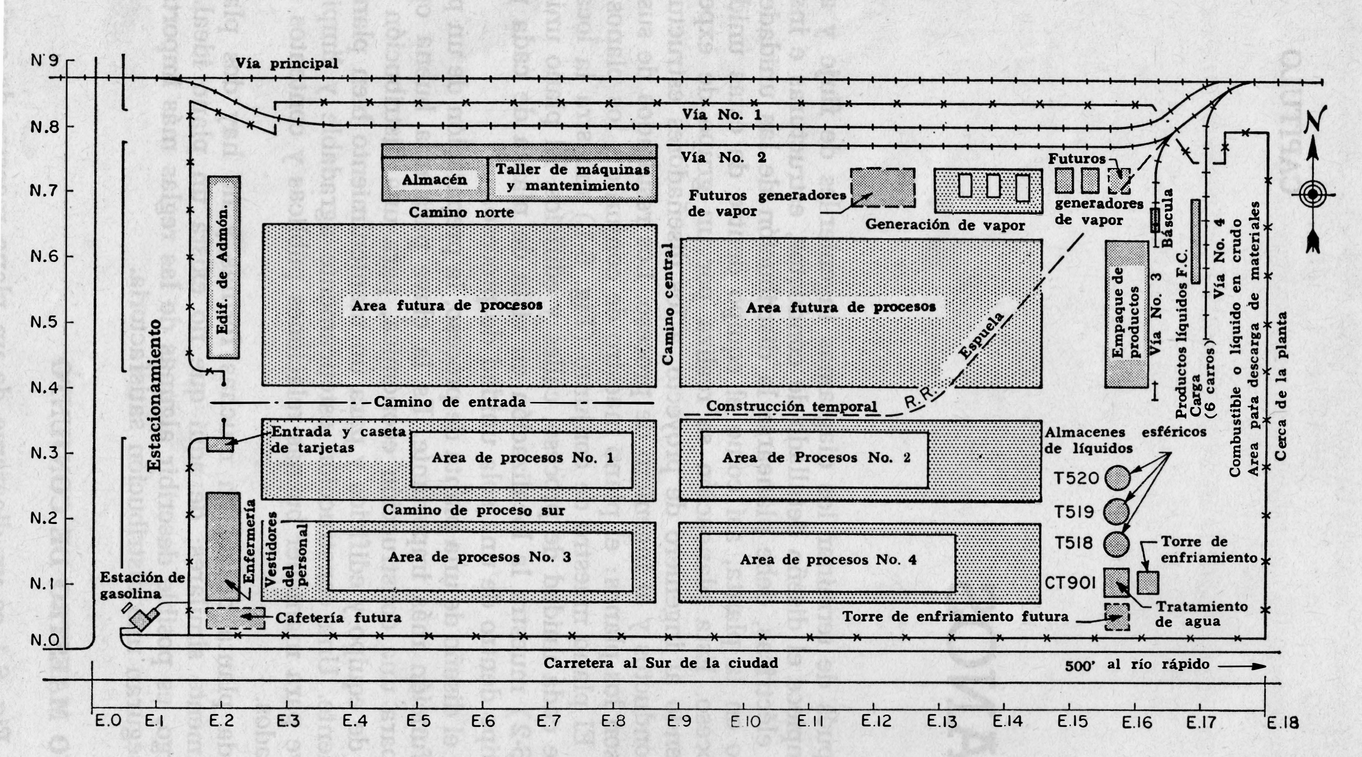


FIG. 6-1. Plano maestro de conjunto

siones. Por lo general, la planta se divide en bloques separados por calles en la forma más conveniente. La localización de las calles y la distribución de los bloques se ve influida por factores numerosos. Algunos de éstos son:

TERRENO TOPOGRÁFICO. El sistema de drenaje puede ser planeado a partir del plano topográfico del terreno. A continuación pueden escogerse tanto las calles como las áreas generales que van a ser destinadas a las unidades de proceso y a edificios. Para este fin se escogen las áreas que menor necesidad de nivelación tengan y en las que las características de carga del terreno sean mejores. Las áreas de mayor nivel pueden usarse ventajosamente para almacén de productos terminados de tal manera que sea posible la carga por gravedad de carros-tanque. Deberán construirse diques adecuados alrededor de estos tanques para prevenir la propagación de incendios en caso de derrames. (Ver Cap. 24.)

FACILIDADES EXISTENTES DE CARRETERAS Y VÍAS DE FERROCARRIL. Las oficinas y almacenes deberán tener libre acceso a la carretera, y los patios de los almacenes así como las áreas para carga de productos, deben estar convenientemente localizados en las inmediaciones al ferrocarril más cercano. Si la planta debe tener instalaciones para embarques marítimos, el almacén de productos terminados debe estar en la vecindad de los muelles, pero lo suficientemente lejos para minimizar el peligro de incendio de éstos.

TIPOS DE UNIDADES DE PROCESO. Si el producto de una unidad de proceso es alimentado a una segunda unidad, las unidades deberán ser adyacentes para reducir costos en conductos y bombeo. Con frecuencia se simplifican la operación, el mantenimiento y la distribución de las instalaciones colocando las unidades semejantes en una sección de la planta.

SEGURIDAD. Las reglas de seguridad se discuten en forma completa en el Cap. 24.

SERVICIOS GENERALES. La planta de energía, talleres, almacén, cafetería y vestidores, deberán estar localizados no solamente para eficiencia máxima y conveniencia, sino también para evitar al máximo la interferencia con los procesos de operación.

Un punto de partida simple para la planeación general es cortar modelos rectangulares a escala de cada unidad de proceso, planta de energía, talleres mecánicos, área de tanques y edificios de oficinas. Estos recortes pueden distribuirse sobre un plano completo del terreno. Cada arreglo puede aun estudiarse preparando diagramas de bloque esquemáticos sobre los cuales cada área es mostrada como un rectángulo y donde se indican todos los conductos que las conectan. Los conductos de servicios también pueden ser incluidos sobre este diagrama. Estos diagramas de bloque son útiles en la determinación del espacio requerido para los conductos interunitarios, ayudando así en forma notable al desarrollo final del plano maestro de

conjunto. La economía de construcción, operación y expansión futura para cada arreglo propuesto determinará el plan más aceptable.

PLANOS UNITARIOS

Los planos unitarios (Fig. 6-2) se preparan en forma similar al plano maestro de conjunto, excepto que los detalles son mayores debido al gran número de elementos que forman la unidad de proceso. En esta etapa principian los modelos a escala y su desarrollo es de gran ayuda para el progreso del diseño. Concretamente, los pasos a seguir en la preparación de los planos unitarios son:

1. Enlístense todas las piezas de equipo mayor, tales como recipientes, cambiadores de calor, bombas y compresoras. Indíquense el tamaño y peso de cada una.
2. Decídase cuál equipo deberá estar elevado. Por lo general, la elevación del equipo es determinada por los requisitos de succión de las bombas o algunos otros requisitos del proceso mismo. La elevación del equipo es siempre costosa y deberá hacerse estrictamente por necesidad de operación satisfactoria del proceso.
3. Estúdiense los procesos de flujo y procedimientos de operación. La secuencia de flujo y la función de cada pieza de equipo deberá ser entendida completamente de tal manera que su distribución en el plano sea funcional.
4. Determínense los métodos de mantenimiento de cada pieza de equipo de tal manera que los equipos que requieren mantenimiento frecuente sean de acceso fácil.
5. Estúdiense todos los peligros de operación, de tal manera que pueda preverse la distribución más segura del equipo. (Véase el Cap. 24.)
6. Planéense las áreas de trabajo del equipo de acuerdo con las siguientes reglas:

   a. No se acerquen las bombas más de tres pies. Espacios menores dificultan el mantenimiento.

   b. El equipo con partes cambiables debe estar distribuido de tal manera que las partes puedan quitarse sin desmantelar grandes longitudes de tubería o tener que mover otros equipos. Es necesario el acceso libre de grúas móviles.

   c. Recuérdese que las cimentaciones tales como las zapatas, a menudo exceden las dimensiones del equipo que soportan. Por tanto, el tamaño de los equipos como el de las cimentaciones deben ser tomados en cuenta.

7. Estúdiense los problemas de instalación de todos los equipos. Siempre que sea posible, su localización debe facilitar la instalación.

La preparación de los planos depende más del juicio basado en la experiencia que de ajustarse a un conjunto de reglas establecidas.

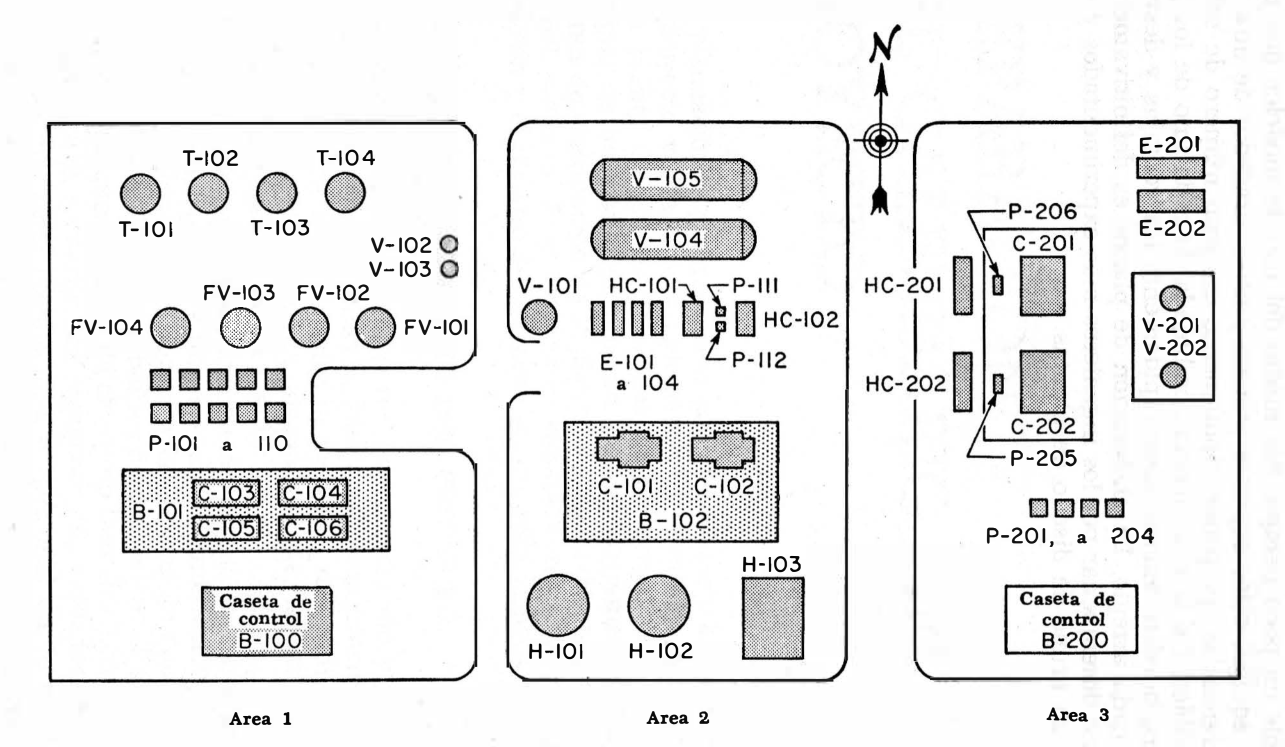


FIG. 6-2. Planos unitarios

CAPITULO 7

PREPARACION DEL CALENDARIO DEL PROYECTO

La planeación y programación cuidadosas son vitales para cualquier proyecto y son tan complejas como el diseño y construcción de una planta de proceso. Después de la terminación del trabajo preliminar de un diseño de proceso, de los diagramas de flujo y de los planos de distribución de la planta, se puede desarrollar un calendario del proyecto. Este calendario vendrá a ser una guía para la planeación y el registro del avance durante toda la obra.

PROPOSITO DEL CALENDARIO DEL PROYECTO

El calendario debe indicar las fechas de iniciación y terminación para las operaciones de ingeniería, dibujo y abastecimiento, así como las de construcción de cada renglón principal del equipo. Si dicho calendario se prepara y se sigue adecuadamente, la terminación del proyecto a tiempo será una cosa segura.

Además de asegurar una terminación razonablemente pronta de un trabajo de construcción y una eficiente coordinación de la ingeniería, los calendarios proporcionan a las firmas de contratistas o a los grupos de diseño de las compañías de operación, el único método de anticipar los requerimientos de elemento humano. Las organizaciones de contratistas, en particular, requieren una cuidadosa planeación con objeto de mantener empleado a su personal en forma sensatamente continua. La utilización más económica de personal puede lograrse cuando se maneja un mínimo de tres o de preferencia cuatro proyectos en forma consecutiva. Un solo proyecto generalmente produce periodos ociosos o deficientes para el personal especializado. El

mismo problema surge con operaciones de proyectos paralelos (dos o más proyectos cuya ingeniería se realiza simultáneamente), puesto que las etapas fundamentales se presentan de manera simultánea.

El calendario ideal de trabajo para cualquier tipo de organización de ingeniería que contrata servicios en diseño de plantas de proceso, se obtendría espaciando contratos consecutivos a modo de permitir intervalos de 30 o 45 días entre ellos. En la práctica rara vez existen las condiciones ideales, dado que el contratista por lo general se enfrenta al compromiso de "comenzar el trabajo inmediatamente" sin importar cuál sea su programa interno de trabajo. No obstante, los calendarios de ingeniería del contratista le ayudan a planear las mejores condiciones posibles.

Una vez que el calendario preliminar está hecho, la organización del personal y la planeación del trabajo se expeditan con facilidad. Sin embargo, el calendario de trabajo debe ser un instrumento vital. Conforme el trabajo avanza, se dispone de información exacta y, por consiguiente, es posible una programación más realista y más detallada.

LA HOJA DE CALENDARIO

Se ha encontrado que un calendario preparado en forma gráfica, como se ilustra en la Fig. 7-1 para una unidad de destilación de un crudo, es de lo más conveniente. Los símbolos se usan para indicar las fechas de iniciación y de terminación. Enfrente de cada equipo se disponen dos renglones. El renglón superior muestra el calendario planeado. El inferior indica el avance real del trabajo hasta la fecha de emisión del calendario (abril 8). Este último renglón muestra el avance hasta esa fecha. Si se requiere, la escala de tiempo puede aumentarse para indicar el avance por semanas en lugar de por quincenas o meses.

Calendarios como éstos pueden ser preparados en formas impresas y reproducidos para su distribución a personal ejecutivo del contratista y del cliente. Esta representación gráfica permite al personal clave determinar rápidamente el avance de la obra, así como planear el trabajo futuro de acuerdo con el calendario propuesto.

COMO SE HACEN LOS CALENDARIOS

El equipo clave y renglones de materiales que se sabe controlan el avance de la obra se anotan en una lista, como en la Fig. 7-1. Para preparar esta lista, el diagrama de flujo y el plano de distribución de la planta son fuentes de información de lo más convenientes. El plano de distribución de la planta proporciona una base lógica para la división del proyecto en secciones. El ejemplo de la Fig. 7-1 corresponde a una sección o unidad.

Clave		
■ Embarque real		▬ - Construcción real
(L) - Plano de distribución	(FR) - Aprobación de fabricación	[O] - Orden de compra
(UD) - Plano no revisado	(R) - Requisición de material	[S] - Embarque requerido
(CD) - Plano revisado	(ED) - Plano de equipo	[P] - Embarque prometido
(CR) - Remisión de planos de construcción	(DA) - Aprobación de planos	═ - Calendario de construcción

A.B.C. OIL CO.
CALENDARIO DEL PROYECTO PARA UNIDAD Núm. 3 DE DESTILACION DE CRUDO

HOJA ___ DE ___
OBRA NUM. ______
FECHA ______
POR: ______

Months: Ene Feb Mar Abr May Jun Jul Ago Sep Oct Nov Dic Ene Feb Mar Abr May Jun Jul Ago Sep Oct Nov Dic

Renglón Núm.	Renglón	Solicitud de orden de compra	Symbols, in chart order
1	Columna C-1 de fraccionamiento	P.O. 1	(R) [O] (CD) (FR) [P] [S]; (R) [O]
2	Partes interiores	P.O. 2	(R) [O] (FR) [P] [S]; (R) [O]
3	Columna C-2 de fraccionamiento	P.O. 1	(R) [O] (CD) (FR) [P] [S]; (R) [O]
4	Partes interiores	P.O. 2	(R) [O] (FR) [P] [S]; (R) [O]
5	Estructura principal de acero		(R) (CD) [O] (FR) [S]
6	Intercambiadores E-4, 5, 6		(R) [O] (ED) (DA) [S]; (R)
7	Acumuladores D-5, 6	P.O. 1	(R) [O] (CD) (FR) [P] [S]; (R) [O]
8	Bombas G-7, 8	P.O. 3	(R) [O] (ED) (DA) [P] [S]; (R) [O] (ED)
9	Turbina G-7	P.O. 4	(R) [O] (ED) [P] [S]; (R) [O] (ED)
10	Motor G-8	P.O. 5	(R) [O] (ED) [P] [S]; (R) [O] (ED)
11	Cimentaciones para los renglones 1 a 10		(UD) (CD) (CR) [S]
12	Area de tubería y @ fraccionamiento		(L) (CD) (FR) [S]
13	Equipo eléctrico		(UD) (CD) (CR) [S]
	Renglones generales		
14	Tubería de patio		(L) (CD) (FR) [S]
15	Soportes de la tubería de patio		(R) [O] (CD) (FR) [S]

FIG. 7-1. Calendario del proyecto: Unidad de destilación de un crudo. Reimpreso con autorización, M. Mattozi, *Oil & Gas Journal,* 51, Núm. 48, 100 (1953)

Las fechas de entrega del equipo controlan la terminación

La siguiente etapa en la preparación de un calendario consiste en determinar la fecha más cercana de terminación. Esta fecha, por lo general, está controlada por el renglón de equipo que tenga la fecha de entrega más tardada.

Una vez que la fecha probable de terminación está seleccionada, la ingeniería, el dibujo y la construcción se programan en detalle a modo de poder completar el calendario maestro.

Todo el esfuerzo de la firma de diseño y construcción debe ser programado para que el trabajo entero esté coordinado. La información, el equipo y los materiales deben influir de manera que ningún grupo se retrase. Esta meta se realizará únicamente si la gente que hace el calendario tiene un conocimiento completo tanto de la secuencia del diseño de plantas y de las operaciones de abastecimiento y construcción, como del tiempo consumido por cada una.

Secuencia de operaciones en diseño y construcción de plantas

Para la mayoría de los proyectos de plantas de proceso, la siguiente es una secuencia típica de las operaciones de diseño y construcción.

1. Diseño de proceso y preparación del diagrama de flujo de proceso.
2. Preparación del diagrama de ingeniería de flujo y de los planos preliminares de distribución de la planta.
3. Diseño parcial de recipientes. Los recipientes principales, por lo general, son renglones de equipo con plazos de entrega largos y pueden ser parcialmente procurados tan pronto como la información del proceso está completa. Las partes interiores, tales como mezcladores, agitadores y demás equipo relacionado con recipientes, deben ser especificadas en este tiempo.
4. Especificación de equipo mecánico, incluyendo transmisiones eléctricas y de vapor, bombas, compresoras, equipo de manejo de materiales, y demás equipo que pueda ser procurado sin la preparación de planos completos.
5. Especificación de instrumentos. Generalmente las válvulas de control se posponen hasta que los arreglos preliminares de tuberías hayan sido completados.
6. Diseño de los principales dispositivos de distribución eléctrica, planta principal y transformadores de subestación, y de dispositivos eléctricos más pequeños, tales como arrancadores de motor, tan pronto como el inciso 4 está completo. Los diagramas de línea para la distribución eléctrica de la planta deben completarse a un grado suficiente para permitir un estudio de cargas en la planta. Este trabajo a menudo se hace sobre una base preliminar a partir de diversos estudios de fuerza de proceso.

7. Diseño y especificación de intercambiadores de calor, calentadores de inyección directa, accesorios varios de los calentadores y equipo de generación de vapor.

8. Preparación de especificaciones de tubería, incluyendo especificaciones de válvulas y listas de números individuales de las válvulas. Esto permite efectuar una separación de válvulas a partir directamente del diagrama de ingeniería de flujo.

9. Terminación del plano general y de los planos por áreas de la distribución de la planta.

10. Planeación de los arreglos de tuberías y elaboración de lista* de materiales para tuberías subterráneas.

11. Diseño de cimentación para recipientes y demás equipo cuyos datos preliminares hayan sido recibidos de los vendedores. Elaboración de lista preliminar de materiales de cimentación. Elaboración de lista de todos los pernos de anclaje del equipo principal. En donde se va a usar piloteado, es probable que los dispositivos para el mismo puedan estar completos en este tiempo y que la introducción de pilotes pueda comenzar. Algunas veces las operaciones preliminares de construcción se inician en este punto.

12. Diseño de acero estructural o diseño de otras estructuras requeridas por operaciones de proceso. Estudios arquitectónicos de los edificios de las plantas.

13. Distribución de ductos para conductores eléctricos y elaboración de lista de materiales eléctricos subterráneos.

14. Diseño de cimentación para equipo eléctrico independiente del mencionado en el inciso 6.

15. Recepción de planos con dimensiones certificadas, de los equipos citados en los incisos 3 a 7.

16. Terminación de arreglos de tuberías a un grado suficiente para determinar y fijar las orientaciones de los puntos de conexión en recipientes.

17. Remisión de planos de recipientes para fabricación. Los fabricantes de recipientes habrán sido seleccionados por medio del inciso 3 anterior.

18. Remisión de planos de cimentación a las fuerzas de construcción para erección.

19. Remisión de planos de acero estructural para procuración y fabricación de acero estructural: remisión de especificaciones de todos los materiales para la construcción, por parte de las fuerzas de construcción, de estructuras elevadas de concreto reforzado.

20. Arranque de la construcción: limpieza del terreno, nivelación preliminar y excavaciones para cimentación.

21. Terminación de la elaboración de lista preliminar de materiales de tuberías para su procuración.

---

* La expresión "elaboración de lista", como se usa en esta descripción, incluye la procuración de los materiales.

22. Terminación de los diversos aceros estructurales principales para soportes de tuberías y elaboración de lista de materiales de todos los renglones varios para usarse en la construcción de campo en la manufactura de soportes de tuberías.
23. Iniciación de los planos de instalación de instrumentos: elaboración de lista de todos los materiales requeridos para la instalación de la instrumentación.
24. Terminación del diseño de tubería y remisión de planos para su fabricación.
25. Terminación del diseño arquitectónico y de la elaboración de lista de materiales para los edificios. Esta fase puede completarse mucho antes para edificios que no se van a usar para operaciones de proceso.
26. Terminación de planos eléctricos y listas de materiales.
27. Terminación de la procuración de todo el equipo principal. La procuración de materiales diversos continúa todavía.
28. Comienza la entrega, en el sitio de la obra, de ciertos renglones de equipo comprendidos en los incisos 4 a 8.
29. Terminación de instalaciones subterráneas.
30. Terminación de cimentaciones.
31. Entrega de renglones principales de equipo y acero estructural, e iniciación de la erección sobre el nivel del piso.
32. Instalación de tuberías.
33. Instalaciones eléctricas.
34. Instalación de instrumentación.
35. Prueba del equipo instalado.
36. Instalación de aislamientos.
37. Limpieza.
38. Procedimientos de operación de arranque.
39. Aceptación de la planta por el cliente.

Un estudio breve de esta lista hace ver la dependencia de cada operación sobre una o más de las operaciones previas. Existe una interdependencia compleja en la cual unos grupos de diseño dependen de la información de otros grupos de diseño, los fabricantes dependen de la información de los diseñadores (la entrega puede dilatarse si esta información se retrasa); y, finalmente, las cuadrillas de construcción dependen de la información de los diseñadores y del material de los fabricantes.

Ejemplo de preparación de calendario

Como un ejemplo de preparación de calendario, considérense los renglones de la Fig. 7-1. Las distribuciones de tubería en la mayoría de las plantas de proceso requieren la mayor parte de horas-hombre aplicadas a dibujo. A los diseñadores y dibujantes de tuberías, por consiguiente, les deben ser entregados cuanto antes los planos de equipo proporcionados por el vendedor y los croquis de recipientes.

Los croquis de recipientes que se basan en cálculos de diseño y códigos aplicables, son preparados por el grupo de diseño de recipientes. Más tarde, estos croquis son remitidos al departamento de procuración acompañados por una requisición u otro documento que describa los requerimientos pertinentes de diseño y las garantías deseadas. La remisión de la requisición al mencionado departamento con el propósito de obtener cotizaciones, en la Fig. 7-1 se designa con el símbolo R. (Con referencia a la parte inferior del renglón 1 se observa que el tiempo de requisición para la columna C-1 estuvo retrasado.) En atención a que las columnas de fraccionamiento (renglones 1 y 3) son más importantes en la distribución de tubería, el tiempo para requisitarlas se programa dos semanas antes que equipo menos crítico, como los acumuladores (renglón 7).

Los planos de equipo proporcionados por el vendedor deben ser recibidos por el grupo de diseño de tuberías, más o menos al mismo tiempo que los croquis de recipientes. La temprana solicitud de cotizaciones (indicada por R) y la colocación del pedido (O) asegurarán la oportuna recepción (ED) de los planos del vendedor. Por lo tanto, estas fechas dependen de la rápida finalización de las especificaciones de diseño de proceso y de las eficientes operaciones de procuración.

Los planos del vendedor y los croquis de recipientes, junto con los diagramas de flujo y los planos de terreno, son transmitidos al grupo de diseño de tuberías para ser empleados en preparar la distribución de tuberías de las líneas principales. La fecha de terminación (L) de esta distribución se estima a partir del número de planos requeridos y del número de personas asignadas a este trabajo.

La distribución de tuberías contiene información suficiente para el diseño preliminar de las principales estructuras de acero y para la orientación de los puntos de conexión en recipientes, lo que a su vez permite la requisición del acero fabricado, R (renglón 5), el diseño de cimentaciones, UC (renglón 11), y el diseño del sistema de distribución eléctrica.

El diseño de la tubería continúa durante este periodo y llega a una etapa tal de terminación que la revisión de planos puede comenzar. Los planos de recipientes se revisan (CD) y envían al fabricante a fin de que él pueda preparar planos de taller. Después de la aprobación de estos planos de taller, el fabricante tiene "luz verde" para fabricar el recipiente (FR).

Los planos del equipo también son revisados y regresados al vendedor, con o sin comentarios. Luego siguen las revisiones de los planos del acero estructural, cimentaciones, tuberías e instalaciones eléctricas, en el orden citado. Al programar este trabajo se debe recordar que para la revisión del acero estructural se necesitan los planos del vendedor y los de recipientes. Para los planos de cimentación se necesitan los planos del acero estructural, los del vendedor

y los de recipientes, y para los planos eléctricos y de tuberías se requieren todos los planos previamente revisados.

Este ejemplo sirve para ilustrar los principios de preparación del calendario. A continuación se proporcionan ciertas sugerencias detalladas para estimar los tiempos de entrega y los requerimientos de horas-hombre que se necesitan en la preparación de un calendario que en la práctica pueda funcionar.

INFORMACION PARA PREPARACION DE CALENDARIO

Plazos de fabricación y entrega

La fecha de entrega del equipo debe tener influencia en todo el trabajo de la organización de diseño, incluyendo el diseño de proceso. El equipo principal, cuyo diseño básico no será grandemente afectado por computación posterior, debe ser diseñado en detalle lo más pronto posible porque, por lo general, dicho equipo tendrá el plazo de entrega más largo. Si se requieren máquinas extraordinariamente grandes o recipientes de paredes gruesas, sus especificaciones o croquis deben ser establecidos lo antes posible y aprobarse en forma preliminar a modo de que las operaciones de procuración puedan efectuarse.

Con objeto de determinar los probables plazos máximos de entrega, el equipo por procurarse debe ser estudiado y debe prepararse una lista de todos los renglones principales. La lista siguiente indica los probables plazos de entrega para diversos tipos de equipo. La fuente más confiable de plazos de entrega son las cotizaciones corrientes, pero la lista que viene a continuación indica plazos probables para varios tipos de equipo y, por consiguiente, puede ser empleada en la preparación de estimaciones.

PLAZO DE ENTREGA O DE MANUFACTURA, TÍPICO PARA DIVERSOS TIPOS DE EQUIPO (1955)

RECIPIENTES

a. Cámaras de pared gruesa o forjada, con espesor superior a 3 plg	12-14 meses
b. Recipientes grandes, de lámina gruesa, mayor de 1 plg de espesor	10-12 meses
c. Tambores u otros recipientes de pared ligera	6-8 meses
d. Recipientes pequeños	4-6 meses
e. Partes internas, platos, o equipo especial	4-6 meses

MÁQUINAS

a. Bombas de gran capacidad, turbinas, compresoras; cualquier máquina con más de 10 ton

de peso 10-18 meses

b. Bombas de mediana capacidad 8-10 meses

c. Bombas y compresoras de baja presión y baja temperatura (unidades de hierro fundido y unidades más pequeñas de acero fundido) 6-8 meses

APARATOS DE INTERCAMBIO DE CALOR

a. Condensadores grandes, aparatos de alta presión o alta temperatura 8-12 meses

b. Intercambiadores ordinarios de calor, de carcasa y tubos 6-8 meses

c. Intercambiadores de doble tubo (superficie extendida) 4-6 meses

CALENTADORES

a. Calentadores de inyección directa (instalados) 6-8 meses

b. Unidades empacadas, de varios tipos 4-6 meses

TUBERÍAS Y ACCESORIOS

a. Tubo fabricado (a partir de la fecha en que el fabricante recibe los planos aprobados) 6-8 meses

b. Tubería diversa, de acero al carbón (dependiendo del tamaño y la cantidad) 1-2 meses

c. Tubería diversa, de aleación o de acero inoxidable (dependiendo del tamaño) 1-6 meses

d. Válvulas, de aleación, de alta presión o especial 6-10 meses

e. Válvulas de control, de aleación y otras 1-6 meses

f. Válvulas, de acero fundido y forjado (dependiendo del tamaño) 1-3 meses

g. Válvulas, de hierro fundido y pequeñas de latón o bronce 1-3 meses

h. Juntas de expansión y accesorios especiales de soporte 1-6 meses

j. Accesorios, de aleación y de acero al carbón (dependiendo del material) 1-6 meses

ACERO ESTRUCTURAL. (A partir de la fecha en que el fabricante recibe los planos aprobados.) 1-4 meses

EQUIPO ELÉCTRICO

a. Materiales eléctricos, motores, cable, tubos conductores (dependiendo del tamaño y

de la cantidad) 1-8 meses

b. Dispositivos de distribución (dependiendo del tamaño) 2-12 meses

INSTRUMENTOS

a. Tableros prefabricados, completos 5-8 meses

b. Instrumentos sencillos 2-4 meses

Requerimientos de horas-hombre para dibujo de ingeniería y construcción

Una vez que las fechas de entrega de todos los renglones importantes han sido determinadas, se deben calcular los requerimientos de horas-hombre para las fases de dibujo de ingeniería, procuración y construcción, a modo de poder desarrollar un calendario realista y poder asignar a la obra la cantidad apropiada de personal.

Una discusión de los requerimientos de material humano se logra mejor mediante el uso de una ilustración típica. Supóngase que un empresario decide construir una planta, cuyo costo total ha sido estimado en 10 millones de dólares. El plazo deseado de terminación es de 18 meses después de la firma del contrato. Los plazos probables de entrega de material hacen posible este plazo de terminación. De manera típica, los requerimientos de material humano y los costos de mano de obra, podrían ser:

	Costo (dls.)	Horas-hombre	Trabajo de iniciación	Meses trabajados
(1) Ingeniería de especialidades	10 000.00	2 500	1er. mes	5
(2) Ingeniería de proyecto	20 000.00	3 100	1er. mes	18
(3) Ingeniería de proceso	30 000.00	7 500	1er. mes	4
(4) Dibujo de diseño, preparación de listas de materiales, preparación de especificaciones, etc.	662 000 00	134 900	2o. mes	14
Ingeniería total	722 000.00	148 000		
(5) Procuración	34 000.00	9 000	1er. mes	10
(6) Mano de obra de construcción	2 744 000.00	914 000	5o. mes	14
Mano de obra total	3 500 000.00	1 071 000		

Las diversas operaciones de esta tabulación se programarían más o menos como sigue:

INGENIERÍA DE ESPECIALIDADES. Esta función por lo general se reparte en los primeros 5 a 8 meses del tiempo de contrato. El per-

sonal puede ser empleado dentro de la primera semana después de la firma del contrato. Este personal realiza ingeniería especializada en la preparación de datos para la procuración de renglones tales como equipo mecánico general, bombas, compresoras, instrumentos, recipientes especiales, intercambiadores de calor, condensadores, diversos tipos de calentadores y mecanismos de distribución eléctrica.

Con excepción de los recipientes, todo el otro equipo de esta categoría puede ser procurado por medio de especificación o sin la preparación (por el comprador) de planos de diseño. Así, el trabajo de este grupo puede proceder tan pronto como el departamento de diseño de proceso ha establecido las condiciones de diseño para el equipo. La selección de cierta instrumentación, tal como las válvulas de control, se difiere por varios meses en atención a que el tamaño y la distribución de la tubería de proceso a menudo tienen influencia en los tamaños de las válvulas.

INGENIERÍA DE PROYECTO. El ingeniero de proyecto y sus ayudantes estarán continuamente empleados durante todo el contrato.

INGENIERÍA DE PROCESO. Se debe asignar el personal suficiente para completar el diseño de proceso lo más pronto posible. La ingeniería de proceso debe proceder a casi todos los otros tipos de diseño. Generalmente, el departamento de dibujo de diseño se le proporcionará la información que sobre diversas partes del proyecto haya sido acumulada por el ingeniero de proyecto, a fin de que el trabajo de dicho departamento pueda comenzar antes que toda la ingeniería de proceso haya sido completada.

Los requerimientos de horas-hombre para la ingeniería de proceso dependen del tipo de proceso, de la disponibilidad de datos fundamentales, de la disponibilidad de personal de ingeniería de proceso y de las políticas de la firma que realiza la obra. Los departamentos de operación del empresario desarrollan y acumulan datos de proceso por medio de experimentación con unidades de operación. Cuando se toma la decisión de instalar una planta o proceso, dichos datos se proporcionan a una firma de contratistas de ingeniería para resolución en las diversas etapas de unidades de operación y finalmente en formas que puedan ser empleadas para diseño detallado. Para tales casos y para el diseño de proceso de procesos conocidos, el plazo requerido por el contratista para la ingeniería de proceso a menudo es muy pequeño. Si se desea que el contratista realice trabajo de investigación y desarrollo y el diseño completo de proceso, el plazo requerido puede ser considerable.

No sería razonable intentar una lista de requerimientos propuestos de plazos para el diseño de proceso. Por lo general, cada obra es exclusiva y el ingeniero en jefe de proceso debe ser consultado cuando se está preparando el calendario. Conviene recordar que los requerimientos de plazo para proyectos que implican investigación

y desarrollo considerables son los más difíciles de estimar. Con frecuencia los problemas difíciles no se adaptan rápidamente a los calendarios. En tales casos es preferible una estimación conservadora.

DIBUJO DE DISEÑO. Los requerimientos se describen más adelante con mayor detalle. Este trabajo cubre todas las funciones posteriores a las fases de proceso y de ingeniería de especialidades. Para la planta ilustrada en el ejemplo considerado, el dibujo de diseño comienza el segundo mes después de la firma del contrato, y llega a un máximo del quinto al octavo mes.

PROCURACIÓN. La procuración debe proseguir a cada etapa de diseño o en caso contrario los planos del vendedor se recibirán tarde causando un retraso en el diseño detallado. La carencia de los planos del vendedor puede parar el trabajo de una manera tan real como la carencia de equipo. Por consiguiente, la procuración debe colocar todos los pedidos con prontitud, con objeto de recibir los planos del vendedor a la brevedad posible y asegurar una oportuna entrega de equipo. Generalmente, la procuración se inicia en el primer mes y puede o no ser continua durante la construcción. Determinada procuración en el sitio de la obra debe continuar mientras la obra esté en avance.

MANO DE OBRA PARA CONSTRUCCIÓN. En el ejemplo ilustrado, la construcción arranca en el quinto mes después de la firma del contrato. Cualquier retraso da tiempo para que una considerable cantidad de material y equipo llegue un poco después de la iniciación de la obra.

Es en extremo importante que el trabajo de construcción no comience demasiado pronto. De ser éste el caso, se encontrarán periodos ociosos en los cuales será necesario esperar la entrega del equipo y materiales. Naturalmente, tales condiciones aumentan el costo.

El tiempo requerido para la construcción de un proyecto dado, por lo general puede ser estimado por firmas de construcción experimentadas. Mattozi[1] ha elaborado una gráfica de calendario de construcción (Fig. 7-2), basada en un análisis de varios proyectos la cual permite estimar el tiempo de construcción cuando se conocen las horas-hombre de mano de obra totales. Generalmente, este requerimiento de horas-hombre se da en la estimación o presupuesto original de la obra, ya sea como una cifra real de horas-hombre o como un costo estimado de mano de obra. Las horas-hombre pueden ser calculadas a partir del costo de mano de obra, dividiéndolo entre el promedio de salario por hora. Si no se puede disponer de esta información, Mattozi[1] sugiere, como una suposición, 18 000 horas-hombre por cada $ 100 000 de valor de materiales y equipo.*

* Con base en los costos de mano de obra y materiales en el año de 1946.

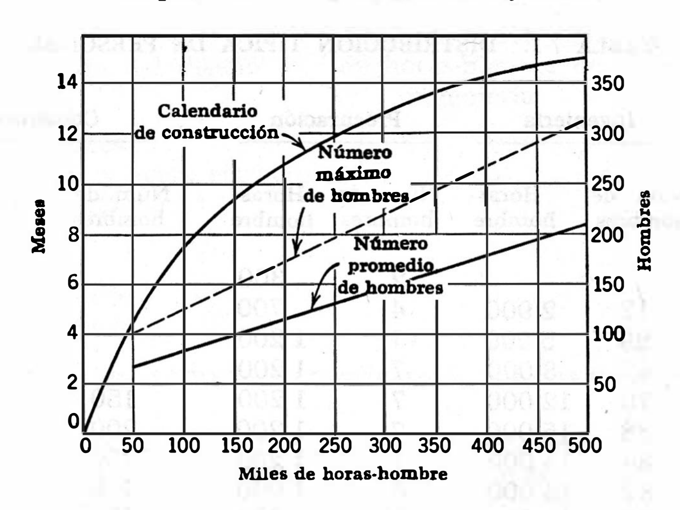


FIG. 7-2. Calendario de construcción. [Reimpreso con autorización, M. Mattozi, *Oil & Gas Journal*, 51, Núm. 48, 100 (1953)]

Planeación de la distribución de personal

La Tabla 7-1 da la distribución de personal, por mes, para el proyecto del ejemplo.

La mano de obra de ingeniería y dibujo durante la parte máxima de la obra es aproximadamente un 500% de la mano de obra inicial. Operando sobre la base de 40 hr por semana, la nómina de ingeniería puede ascender a unos $14 000.00 por semana para el 6o. y 7o. mes. Si se va a sostener a un grupo grande, las firmas que contratan ingeniería deben, por consiguiente, estar preparadas para aceptar un gasto considerable.

Los calendarios para las diversas fases de la ingeniería, rara vez son precisos. Probablemente la operación más eficiente o práctica para las firmas dedicadas a servicios de ingeniería es disminuir el personal y trabajar horas extras durante las cargas máximas de trabajo. Otra alternativa es la versatilidad del grupo de trabajo con el movimiento de personal, conforme se va requiriendo en las diversas operaciones. Muchas firmas más pequeñas operan muy efectivamente sobre este último principio.

Cálculo de requerimientos de horas-hombre para dibujo

Diversas firmas contratistas de ingeniería han ideado varios métodos para determinar los presupuestos de horas-hombre empleados en dibujo de diseño. La mayoría de estos métodos están basados en la experiencia de la firma particular y de ordinario no son útiles

TABLA 7-1. DISTRIBUCION TIPICA DE PERSONAL

Tiempo	Ingeniería		Procuración		Construcción	
Mes	Núm. de hombres	Horas-hombre	Núm. de hombres	Horas-hombre	Núm. de hombres	Horas-hombre
1			2	300		
2	17	2 900	4	700		
3	29	5 000	7	1 200		
4	47	8 000	7	1 200		
5	70	12 000	7	1 200	150	26 000
6	88	15 000	7	1 200	200	34 000
7	88	15 000	7	1 200	350	60 000
8	82	14 000	6	1 000	470	81 000
9	76	13 000	3	500	590	100 000
10	70	12 000	3	500	650	110 000
11	70	12 000			650	110 000
12	59	10 000			600	102 000
13	47	8 000			600	102 000
14	35	6 000			400	68 000
15	12	2 000			300	51 000
16					200	34 000
17					150	26 000
18					59	10 000
		134 900		9 000		914 000
Total de horas-hombre						1 057 900
Otros servicios de ingeniería						13 100
						1 071 000

cuando se aplican a otras firmas que tienen métodos diferentes. No obstante, la distribución del trabajo en los porcentajes que se anotan más adelante, es aplicable a casi cualquier tipo de unidad que procesa fluidos. En general, el dibujo del equipo mecánico, recipientes y tubería consume del 55 al 65% del total de hombres-hora, para cualquier tipo de unidad de proceso. En términos generales se puede suponer que para aquellos procesos en los cuales se reducen los requerimientos de tubería, los aumentos correspondientes se reflejarán en equipo mecánico, en recipientes o en ambos. Se debe entender que los porcentajes que se mencionan a continuación se aplican a unidades sencillas. Si se va a estimar un proyecto que consiste de diversas unidades, cada unidad o elemento debe ser considerado de manera separada.

Categoría del diseño	Porcentaje del total de horas-hombre de ingeniería	Variación posible ±
A. Cimentaciones	7	2.0
B. Estructuras y acero estructural	15	3.0
C. Equipo mecánico (*)	3	1.0
D. Recipientes	7	2.0
E. Tubería	55	11.0
F. Equipo eléctrico	6	2.0
G. Instrumentación	7	2.0

(*) Incluye bombas, compresoras, intercambiadores de calor y cualquier tipo de equipo mecánico no ilustrado.

Algunas veces se puede hacer una estimación preliminar o global del tiempo de dibujo de diseño mediante un método de porcentajes que se aplica a partir del costo particular de la unidad de proceso. Por ejemplo, el costo de los materiales para una cierta unidad ha sido estimado en 4 millones de dólares. Para este tipo particular de unidad, con base en contratos similares anteriores, por cada $ 100 de costo de materiales se requerirán dos horas-hombre de operaciones combinadas de ingeniería, dibujo de diseño y preparación de listas de materiales. De esta suerte, se podría establecer un presupuesto estimado de 80 000 horas-hombre.

Utilizando los porcentajes anteriores, la distribución tentativa de trabajo podría ser como sigue:

Categoría del diseño	Horas-hombre
A	5 600
B	12 000
C	2 400
D	5 600
E	44 000
F	5 600

Esto parece ser un análisis simple y directo, pero tales estimaciones no son confiables a menos que la estimación inicial de horas-hombre sea exacta. Por preparar realmente un presupuesto de horas-hombre, se necesita preparar una lista de equipo. A partir de ella se puede preparar una lista detallada de planos. Aplicando valores de horas-hombre requeridas por plano, de acuerdo con la categoría del diseño, se pueden determinar el presupuesto total de horas-hombre y el presupuesto detallado, por categoría.

Como una ilustración del método utilizado en la estimación del número de planos requeridos, supóngase que las siguientes partidas de equipo son una lista parcial de las partidas requeridas para una

planta de proceso. La lista consta de dos partes: *D*, Recipientes y, *C*, equipo mecánico.

Número de partida

D. Recipientes

T-101	recipiente vertical de 10′ de diámetro × 60′ de longitud
T-102	recipiente vertical de 8′ de diámetro × 45′ de longitud
T-103	recipiente vertical de 9′ de diámetro × 55′ de longitud

C. Equipo mecánico

C-101	Compresora de 650 hp impulsada por máquina
C-102	Compresora de 430 hp impulsada por máquina
C-103	Compresora de 520 hp impulsada por máquina

A partir de dichos renglones de equipo, inmediatamente se puede hacer una lista tentativa de planos.

Planos para los recipientes

D. Recipientes	3	Planos de recipientes (para cada recipiente todos los detalles generalmente se encuentran en un solo plano)
A. Cimentaciones	1	Para los renglones T-101, 102, y 103 anteriores
B. Estructuras	3	Escaleras y plataformas para T-101, 102 y 103
F. Instalaciones Eléctricas	3	Conductores y alumbrado para instalaciones eléctricas e instrumentos
G. Instrumentos	1	Planos esquemáticos de instalación de instrumentos
Aislamiento	1	Detalles de aislamiento para T-101, 102 y 103. En la lista de porcentajes no se muestra el aislamiento, ya que por lo general es despreciable con respecto al dibujo total de diseño.
	—	
Subtotal	12	Planos para *D*

Para máquinas tales como C-101, 102 y 103, se impondría cierta clase de construcción de resguardo.

Planos para el equipo mecánico

A. Cimentaciones	3	Edificio de compresoras, vista de planta, sección, detalles
Cimentaciones	4	Cimentaciones para compresoras C-101, 102 y 103
B. Edificio de compresoras	1	Vista de planta de la distribución
Edificio de compresoras	1	Acero estructural
Edificio de compresoras	1	Vista de planta del techo y elevaciones
Edificio de compresoras	1	Detalles arquitectónicos
D. Recipientes diversos para accesorios de las compresoras	6	Frascos para la compresora, frascos para el aire de arranque, frascos para agua, sistema de agua, combustible, sistema de lubricación.
E. Tubería	6	Tubería de proceso
Tubería	2	Sistema de agua de enfriamiento y sistema de lubricación
Tubería	1	Sistema de aire de arranque
F. Instalaciones eléctricas	3	Vistas de planta, secciones, detalles de fuerza y alumbrado
G. Instrumentaciones	1	Detalles de instalación
	—	
Subtotal	30	Planos para *C*
	—	
Total para *D* y *C*:	42	Planos

A partir de la lista original de 6 renglones: T-101, 102 y 103, y C-101, 102 y 103, se ha obtenido una lista de 42 planos. Aplicando un valor de horas-hombre por plano, el total de horas-hombre puede ser estimado como sigue:

Plano tipo	Horas-hombre/Plano
A	200
B	150-200
C	150-250
D	150-200
E	300-400
F	175
G	250

Categoría del diseño	Núm. de planos	Horas-hombre Plano	Total de horas-hombre
A Cimentaciones	8	200	1 600
B Estructural	7	200	1 400
C Mecánico	—		
D Recipientes	9	200	1 800
E Tuberías	9	400	3 600
F Instalaciones eléctricas	6	175	1 050
G Instrumentación	2	250	500
(Aislamiento)	1	200	200
Total	42		10 150

Este ejemplo es muy incompleto, puesto que no se incluyó tubería alguna en la primera lista para los tres recipientes. Otro dibujo que sería incluido en una lista completa es la tubería de proceso y de servicios para los recipientes, tubería de servicios para calentamiento e instalaciones sanitarias en el edificio de compresoras, y detalles mecánicos para accesorios de recipientes y para aparatos de elevación de materiales en el edificio.

La confiabilidad de cualesquiera datos, tales como los porcentajes de distribución de trabajo de horas-hombre por plano, depende grandemente de métodos operacionales y de la magnitud de datos estadísticos. Tales datos están sujetos a muchas variables, inclusive dentro de una empresa, y no pueden ser aplicados con confianza a menos que se prueben continuamente. Datos estadísticos sobre mano de obra deben ser acumulados y revisados con regularidad.

Al programar las horas-hombre de dibujo se debe tener en cuenta que el total de horas-hombre requeridas para cada operación, no siempre puede ser continuo. Se podría suponer, por ejemplo, que las 1 800 horas-hombre estimadas para recipientes en la ilustración anterior, podrían ser completadas en un mes por 10 hombres. Este razonamiento no puede ser aplicado, en vista de que ciertos recipientes requerirán el máximo de horas-hombre en tanto que otros probablemente estarán por debajo del mínimo. Además, el diseño de recipientes por lo general avanza hasta un punto cercano al 60%, en donde debe ser interrumpido para esperar la terminación de la tubería. Entonces puede usarse un 10 a 20% adicional en completar la orientación de los puntos de conexión o de los soportes para adaptar la tubería. Después de esto, debe seguir otro periodo de espera mientras el fabricante del recipiente completa sus planos de taller. Los diseñadores del recipiente deben entonces verificar los planos del fabricante por lo que se refiere a resistencia de materiales y exactitud, antes que los planos originales puedan ser completamente aprobados, ya que las prácticas de diseño del fabricante algunas

veces afectan al diseño original. Por consiguiente, pueden pasar varios meses entre el esfuerzo inicial del diseño y su terminación, la mayor parte de los cuales se consumen a la espera de datos, ya sea de la empresa que originó el diseño o del fabricante. Por esta razón, varias obras en diversas etapas de terminación sirven para mantener una carga de trabajo relativamente constante.

Al programar el trabajo es necesario que la organización intente el máximo empleo de todo el personal. Una ayuda para lograr esto consiste en la preparación de una gráfica de barras o un cuadro de plazos mensuales en donde se ilustren los diversos proyectos de una firma, sus fechas de iniciación y los plazos anticipados para cada fase del trabajo. De esta manera, para determinar los posibles máximos o mínimos de recursos humanos se puede utilizar una cuenta de hojas de planos. Las obras nuevas deben ser programadas a modo de iniciarse durante las cargas mínimas de trabajo conocidas anticipadamente.

Con independencia del número de hombres disponibles, en un momento dado, únicamente una persona puede ser empleada en un plano. No es, por consiguiente, una buena práctica el utilizar hojas grandes de planos. Mediante una reducción en el tamaño de los planos puede lograrse un mejor empleo del elemento humano. Esto aumentará el número de planos e incrementará, así, el posible uso del recurso humano. Existe, por supuesto, un límite práctico en la reducción del tamaño, aunque la utilización de mayores escalas sirve para aumentar el número de planos requeridos.

DEPARTAMENTOS DE PROGRAMACION

Tanto los contratistas como las compañías de operación que hacen una cantidad considerable de su propio diseño y dibujo de ingeniería, encuentran deseable establecer un departamento permanente de programación. Este departamento debe estar integrado por personas que tengan una experiencia adecuada en todas las fases del diseño y construcción de una planta de proceso. La preparación del calendario de un proyecto de varios millones de dólares no es, ciertamente, el trabajo de un empleado mal remunerado. Dicho trabajo requiere un hombre de amplia experiencia, que esté completamente familiarizado con las cuatro etapas de la construcción de plantas de proceso, a saber: diseño de proceso, diseño mecánico y dibujo, procuración y erección.

Las firmas contratistas han encontrado ventajoso el uso de un departamento de programación, dado que dichas firmas de ordinario están comprometidas con la ejecución de más de una obra. En tales situaciones es preferible que la preparación del calendario del

proyecto sea hecha por un grupo de personas que tengan un punto de vista general y que no estén interesadas solamente en una obra particular. Si un ingeniero de proyecto programa su propia obra, existe una tendencia a favorecer dicha obra. Empero, es esencial que el ingeniero de proyecto ayude, en la preparación del calendario del proyecto, al grupo que se encargue de hacerlo.

REFERENCIA

1. Mattozi, M., *Oil and Gas Journal, 51*, Núm. 46, 304; Núm. 47, 180; Núm. 48, 100; Núm. 49, 102 (1953).

CAPITULO 8

DISEÑO DE INGENIERIA Y DIBUJOS

Los ingenieros especialistas y los dibujantes técnicos empezarán el trabajo de diseño, después que el ingeniero de proyecto haya recibido las especificaciones del proceso y en general las especificaciones mecánicas,* los dibujos preliminares y los croquis del proyecto. El trabajo de estas personas consiste en convertir tanto los cálculos como las decisiones de los ingenieros encargados del proceso y proyecto en dibujos y en fijar las especificaciones que sean indispensables para la obtención, fabricación y montaje de acuerdo con las facilidades que se tengan en la planta.

Por lo general, el trabajo de ingeniería y dibujo se distribuye entre grupos de especialistas, según sea la fase del diseño. El trabajo de dichos especialistas se divide en dos categorías principales: ingeniería de equipo especializado y en dibujos de los diseños elaborados.

INGENIERIA DEL EQUIPO ESPECIALIZADO

Los detalles de las especificaciones mecánicas del equipo de un proceso, son decididos por los ingenieros especializados en el equipo, junto con el ingeniero de proceso. Aquéllos, también ayudan a se-

* Con frecuencia, una parte de las especificaciones mecánicas las proporciona la compañía para la cual se está construyendo la planta (véase Cap. 11). Estas son agregadas a las especificaciones del diseño después de aprobarlas el cliente; la guía general para todos los diseños mecánicos incluye tuberías, estructuras, electricidad y diseño de equipo.

leccionar el equipo que mejor reúna las especificaciones del proceso. Se tienen los siguientes grupos de especialistas:

Bombas y compresoras. En este grupo se incluyen a ingenieros especializados en bombas y compresoras y son los que se encargan de la selección de las mismas, ya que están en contacto directo con los fabricantes; además de seleccionar al mejor equipo para un trabajo determinado, asesoran a los ingenieros del proceso y proyecto sobre problemas referentes a aplicaciones industriales.

Intercambiadores de calor. Este grupo está integrado por expertos en el diseño de intercambiadores de calor, quienes pueden verificar cotizaciones y especificaciones de todos los equipos, haciendo cálculos y diseños para efectuar comparaciones. Algunos contratistas fabrican sus propios intercambiadores de calor y ellos mismos hacen los cálculos para posteriormente efectuar el diseño.

Diseño de recipientes. Los recipientes deben construirse de acuerdo a las necesidades del proceso; toda compañía dedicada al diseño de plantas deberá tener un grupo de diseñadores expertos en recipientes, para diseñar recipientes a cualquier presión, tanques, chimeneas y ductos, de acuerdo con las especificaciones del cliente y con los códigos correspondientes. Los diseñadores de recipientes preparan o supervisan los esquemas del recipiente así como también el arreglo interno de los mismos.

Instrumentos. El avance tan rápido en este campo requiere de ingenieros dedicados por completo a la instrumentación, éstos asesoran a los ingenieros de proceso y de proyecto en la instrumentación necesaria para el desarrollo de los diagramas de flujo, también especifican y seleccionan todos los instrumentos necesarios para el proyecto.

Hornos. Las firmas contratistas que construyen hornos tienen un grupo de diseñadores quienes calculan con detalle las dimensiones apropiadas de los hornos y la instalación de los calentadores. También diseñan el tiro de dichos hornos. Las compañías que usan hornos pero que no los fabrican, tienen un pequeño grupo de expertos en hornos quienes preparan las especificaciones del horno y seleccionan el mejor para un trabajo específico.

Materiales para tuberías. Los expertos en materiales para tuberías asesoran en el diseño de la tubería y especifican el tipo de aislamiento para cada caso. En los dibujos de la tubería se incluyen los materiales y accesorios necesarios, seleccionando los materiales de acuerdo a las especificaciones y a los códigos correspondientes.

Equipos varios. Cada proyecto de una planta de proceso en cierta forma es único, pudiendo tenerse ciertos equipos especiales que no manejan los grupos anteriores; éstos deben ser seleccionados o diseñados. En muchos proyectos pueden utilizarse equipos tales como secadores, filtros, aparatos para manejo de materiales

autoclaves, centrífugas, evaporadores y mezcladoras. Por lo general, los ingenieros de proceso y de proyecto, colaboran para indicar las especificaciones y para la selección del equipo; sin embargo, algunas compañías han encontrado ventajoso tener a un grupo experimentado de ingenieros químicos y mecánicos quienes se especializan en una gran variedad de equipos de la planta que no son comunes a todas las instalaciones. Además de su trabajo de rutina, estas personas hacen el diseño mecánico del equipo para construirse a la orden, en caso de que este equipo no se fabrique regularmente.

DIBUJOS DE DISEÑO

Después que se ha efectuado la selección del equipo de una planta, su diseño se completa a través de planos o dibujos en los cuales se describen las cuatro categorías principales: Diseño de tuberías, diseño estructural, diseño eléctrico y diseño e instalación de instrumentos. El diseño de la planta está íntimamente relacionado con la información dada en los dibujos o planos de trabajo. Se usan las técnicas del dibujo para la elaboración de los dibujos antes mencionados.

Diseño de tuberías

El diseño de tuberías es muy importante en una planta de proceso, se puede considerar que se gasta de 40 a 60% del presupuesto total de ingeniería en el diseño y elaboración de los dibujos de tubería (dibujos de diseño).

El sistema de tuberías está íntimamente relacionado con la ingeniería del proceso. Los diseñadores que proyectan las tuberías para una planta, deben conocer mejor que el resto del personal las necesidades de los diferentes procesos. Por ello, las compañías que proporcionan servicios de ingeniería dependen principalmente del personal que emplean para el diseño de tuberías para la elaboración de las diferentes fases del trabajo.

El personal que efectúa el diseño de tuberías, tiene las siguientes funciones:

a. Trazado y diseño de todas las tuberías de acuerdo con las especificaciones y los códigos aplicables.

b. Orientación de las toberas que hay en los recipientes a presión.

c. Verificar que en los dibujos se tengan los espacios adecuados para la instalación de estructuras de acero, cimentaciones y otros equipos.

d. Estudiar la disposición de las tuberías a fin de que los esfuerzos resultantes sean los adecuados.

e. Calcular los esfuerzos en las tuberías.
f. Listar y especificar las juntas mecánicas de expansión (fabricadas).
g. Mostrar en los dibujos de la tubería todas las cargas que actúan, incluyendo cargas axiales y localizar tentativamente la posición de anclas y soportes.
h. Hacer todos los cálculos analíticos en forma reproducible.
i. Diseñar, seleccionar y hacer una lista de soportes de tuberías y de otros soportes.

Diseño estructural

El personal de este grupo diseña todas las cimentaciones, todas las estructuras de acero y/o concreto reforzado y todos los edificios de tipo industrial, en este grupo trabajan también arquitectos. Por el hecho de que muchas de las cimentaciones van bajo tierra, el personal de este grupo deberá estar en contacto con los que diseñan las tuberías a efecto de poder hacer instalaciones correctas. Es práctica común, indicar en el mismo dibujo todo lo que se va a instalar bajo tierra tal como cimiento, tuberías y conductos para electricidad. Este procedimiento es muy ventajoso tanto en el diseño inicial como durante el montaje. El personal de este grupo deberá apegarse a los códigos vigentes y a las especificaciones particulares del trabajo; sus funciones son las siguientes:

a. Preparar los bosquejos de diseño y hacer los cálculos correspondientes.
b. Preparar los dibujos donde se muestren los detalles de las estructuras de acero.
c. Preparar los dibujos del edificio y diseños de la calefacción, ventilación y plomería.*
d. Hacer una lista y especificación de todos los materiales.

Diseño eléctrico

La responsabilidad del personal de este grupo consiste en hacer el diseño eléctrico completo que se necesita para el proyecto de acuerdo con las especificaciones particulares y con los diferentes códigos aplicables a instalaciones eléctricas. Específicamente el trabajo consiste en:

a. Trazado de todos los conductos eléctricos y dibujos finales.
b. Elaboración de todos los dibujos eléctricos para subestaciones, arreglos de los dispositivos de distribución, etc. (***Nota***: **en lugares** donde se tienen cimientos de concreto reforzado, se hacen

* Algunos contratistas disponen de un grupo separado de ingenieros especialistas en calefacción, ventilación y aire acondicionado, pero por lo general, este trabajo es subcontratado.

croquis indicando la posición de registros para inspección y de los soportes del equipo eléctrico. El diseño de la obra de concreto lo realiza el personal que diseña las estructuras. Por lo general, los encargados del diseño eléctrico elaboran los dibujos de las estructuras de acero que se necesitan para colocar los interruptores, subestaciones, etc. Si la estructura que se necesita es muy grande, el trabajo deberá ser completado o verificado por el personal que diseña las estructuras. Los registros para la inspección de los sistemas eléctricos que van bajo tierra, los diseña el personal encargado del diseño eléctrico, éstos deben construirse con espacio adecuado para poder acomodar todo el equipo eléctrico. El personal que diseña las estructuras especifica el espesor de las paredes, así como la localización de las varillas de acero en las mismas.)

c. Preparación de todas las especificaciones del equipo eléctrico. Junto con el ingeniero de proyecto se especificará la mejor posición de los dispositivos de distribución de la planta y de la subestación.

d. Elaboración de los dibujos de los conductos para todos los instrumentos eléctricos junto con los instrumentos (sistemas) diseñados por el personal.

e. Lista completa de todos los materiales eléctricos, cables, conductos, etc.

f. Por lo general, el personal del grupo mecánico especifica la potencia necesaria, rotación y algunas otras necesidades mecánicas. Sin embargo, las especificaciones completas de los motores las prepara el personal encargado del diseño eléctrico junto con el personal de ingeniería.

Ingeniería de la instrumentación

En el Cap. 20, se cubre con más amplitud lo correspondiente a ingeniería de la instrumentación de una planta de proceso. Los especialistas en instrumentos, antes que se elaboren los dibujos preparan y seleccionan las especificaciones de los instrumentos que se van a utilizar, y no necesariamente se tendrá una asociación directa con los ingenieros de la instalación. Las obligaciones del personal de este grupo son las siguientes:

a. Elaborar los dibujos de los arreglos generales para la instalación de los instrumentos, mostrando con símbolos la localización de todos los instrumentos a lo largo de las tuberías.

b. Listar todos los instrumentos y mostrar en los dibujos de la tubería el lugar sobre el cual se va a localizar el instrumento primario, el número de partida y tipo de instrumento (indicado por un símbolo), el tipo de capilar y las conexiones para aire o eléctricas que son necesarias en el sistema de control.

c. Elaborar los dibujos que muestren los detalles de la instalación y montaje de todos los instrumentos, con excepción de las válvulas de control las cuales son señaladas por el personal que diseña la tubería. Generalmente, en los dibujos que muestran la instalación de los instrumentos se detallan los acoplamientos y anexos especiales necesarios para las válvulas de control. (*Nota*: todos éstos dibujos son esquemáticos con excepción de los detalles que muestra la conexión al equipo.)

d. Elaborar los dibujos con detalles del tablero de control para su fabricación y elaborar todos los dibujos que van por atrás del mencionado tablero de control el cual se instalará en el cuarto de control. Elaborar los dibujos que van al frente del tablero cuando se tienen gráficas de los mismos.

e. Hacer una lista de las diferentes tuberías y de otros materiales empleados; con excepción de la de los conductos eléctricos y del alambrado eléctrico, esta lista será elaborada de acuerdo con el personal del grupo eléctrico y en esta forma evitar el desperdicio de material al haber duplicación del mismo.

f. Revisar los dibujos del vendedor de instrumentos. En estos dibujos se deberán mostrar detalles referentes a dimensiones de los instrumentos. Los dibujos que elabora el personal de este grupo se trazan en forma esquemática. Deben indicarse todas las dimensiones del equipo que se vaya a instalar localmente, tales como aparatos indicadores de nivel que se conectan físicamente con otros equipos.

g. Revisar los dibujos de tuberías para comprobar la localización apropiada para los orificios y aparatos de control manuales y automáticos, paredes térmicas, puntos de presión, etc. Revisar además todos los dibujos para verificar la localización apropiada de los equipos primarios.

Tipos de dibujos para plantas de proceso

Por lo general, se tienen dos tipos de dibujos para proyectos de plantas de proceso: los dibujos preparados por los diseñadores y los preparados por los fabricantes. Casi todos los dibujos que son elaborados por los diseñadores de las plantas se usan para evitar el correspondiente pago a los distribuidores o para la elaboración de la lista de materiales con las subsecuentes ventajas.

1. Dibujos elaborados por los diseñadores de la planta de proceso:

a. Dibujos necesarios para la instalación del equipo, ya sea para fabricarse en el mismo sitio de su construcción o bien para mandarse a fabricar en algún taller; también se usan para conocer la lista de materiales.

b. Los dibujos preparados por el fabricante de equipo, o por otras personas se basan en el diseño inicial o general del comprador.

c. Los dibujos que se hacen para la construcción de equipo, también se usan para la elaboración de la lista de materiales.

2. Dibujos e información de los fabricantes.*

a. Dibujos elaborados por el fabricante para uso propio, para manufactura o fabricación; algunas veces son llamados dibujos de taller.

b. Dibujos de montaje, preparados por el fabricante y usados por el cliente para montaje del equipo comprado.

c. Dibujos mostrando dimensiones, hojas de información, hojas sueltas de catálogos, éstas son preparadas por el fabricante para que el cliente las use en el diseño.

Dibujos para instalación

Para el proyecto de una planta de proceso, se necesita, en primer lugar, la elaboración de dibujos que muestren la localización del equipo a una escala distinta de la que se tiene en los dibujos que muestran los detalles de su fabricación, construcción o montaje. Por ejemplo, resulta imposible construir una unidad de desintegración catalítica si no se tiene una ilustración gráfica de la posición que tienen los diferentes equipos. Para estas instalaciones, debe planearse cuidadosamente la localización de los equipos y marcar en los dibujos las necesidades de espacio. Por lo tanto, todas las partes de una planta deben ser dibujadas detalladamente en sus posiciones y a escala. A fin de poder efectuar el montaje, deberán mostrarse las dimensiones de todas las conexiones.

La localización del equipo y los dibujos para instalación son muy importantes, ya que tanto las estructuras de acero, bombas, compresoras, recipientes y demás equipo, deben fijarse mediante tornillos de anclaje a los cimientos de concreto correspondientes. Antes de la elaboración de los dibujos de cimientos y soportes, se deben conocer las dimensiones del equipo y su localización. La construcción no podrá iniciarse hasta no tener los dibujos correspondientes.

Impresos del fabricante

Resulta de vital importancia en un proyecto, el manejo adecuado de los impresos proporcionados por el fabricante (información y

* **Esta información y dibujos son conocidos como *impresos del fabricante*.**

dibujos). La carencia de esta información o su maltrato por algún descuido, pueden producir serios errores que aumentan el costo del trabajo de ingeniería y el montaje del equipo. Aun cuando no es factible describir la variedad de métodos y procedimientos que emplean las diferentes compañías, resultan de mucha ayuda las recomendaciones y métodos de distribución que el fabricante describe en los impresos.

Los tres tipos de impresos que proporciona el fabricante son: dibujos de taller, dibujos de montaje y dibujos de dimensiones con hojas de información.

Por lo general, el vendedor de equipo no proporciona los dibujos de taller excepto los de tuberías fabricadas, recipientes de presión y tanques, estructuras de acero y algunos otros objetos diseñados de acuerdo a las necesidades especiales del cliente. El cliente no necesita de estos dibujos para los diseños de la planta, el vendedor los utiliza para dar a conocer sus equipos. En los dibujos de taller se muestran cada una de las piezas que forman el ensamble.

Los impresos del vendedor utilizados para montaje, los usa el cliente para identificar al equipo fabricado y para indicar la secuencia del montaje.

El tercer tipo de impresos del vendedor está constituido por dibujos en los que se indican dimensiones y hojas de información, los utiliza el cliente como fuente de datos para los diseños de la planta. Por lo general, el fabricante no le proporciona al cliente todos los detalles referentes a la fabricación del equipo mecánico que él construye, pero le proporciona la información necesaria para la instalación. Esta información consiste en dibujos o bosquejos en los que se muestra tanto en planta como en elevación todas las dimensiones de tuberías y conexiones, dimensiones de piezas a ensamblarse, localización de tornillos para anclaje, peso total y cada una de las partes del ensamble y las dimensiones generales con el objeto de definir los claros o espacios necesarios. Se incluye además para ciertas máquinas de pistón, la dirección, frecuencia y grado de operación de las fuerzas involucradas. También se proporcionan los diagramas de flujo para los sistemas de lubricación y enfriamiento y los diagramas de alambrado.

El vendedor proporciona las hojas de información correspondientes al equipo auxiliar de máquinas grandes. El cliente deberá elaborar una lista completa de todo el equipo auxiliar, asignándole un número a cada detalle o dato de las mismas, esta lista se distribuye entre el personal, de tal modo que los ingenieros puedan hacer en forma rápida las identificaciones que facilitan el montaje.

Por lo general, los fabricantes de equipo grande lo construyen previa orden y no se tienen equipos en existencia o en almacenes. Si anteriormente el fabricante ha construido un equipo similar o

idéntico, podrá proporcionarle al cliente los datos preliminares y hacerle alguna oferta, pero el diseño de la planta de proceso no deberá basarse en datos aproximados. Resulta a veces preferible esperar un mes o más tiempo hasta recibir la información exacta del equipo solicitado.

Se requiere de los impresos del vendedor para todos los tipos de equipos, con excepción de aquellos que son fabricados en grandes cantidades y que son de dimensiones estándar. Por ejemplo, no es necesario pedir dibujos de bridas forjadas de acero, ya que éstas se fabrican de acuerdo a varios códigos y sus dimensiones son fijas y estándar. Lo mismo puede decirse de las válvulas ordinarias o de cualquier otro equipo de manufactura común el cual no se diseña especialmente para una simple aplicación.

Archivo y distribución de los impresos del vendedor

El manejo de los impresos del vendedor debe hacerse con mucho cuidado debiendo manejarlos de acuerdo a un procedimiento. Un error muy común es perder la propia identificación de los impresos. Estos errores conducen a gasto de esfuerzo y retrasan el trabajo de fabricación.

El requisito más importante para el mejor manejo lo constituye el número de identificación de cada equipo. Entre las instrucciones específicas solicitadas al vendedor, debe pedírsele que incluya en cada uno de sus dibujos el número del equipo. En compañías muy grandes es posible utilizar equipo muy parecido, pudiendo incurrirse en errores si no se tiene una identificación bien definida. El vendedor no deberá usar como identificación el número de orden de la compra respectiva, esta información será insuficiente ya que en la misma orden se podrán incluir a varios equipos.

En todos los dibujos y hojas de información deben ponérseles en la parte superior la fecha en que fueron recibidos, después ser revisados por alguna persona o por un grupo de personas, preferentemente por aquellos que se encarguen de la distribución interna y externa. En algunas compañías, estos grupos pertenecen al departamento de producción. Las funciones de este personal son las de recibir y registrar los datos para el diseño, archivar dicha información, identificar la información recibida y efectuar su distribución adecuada tanto en forma interna como externamente. Es común tener en el mismo departamento, servicio de reproducción de dibujos como copias heliográficas. Este departamento se responsabiliza del flujo adecuado de la información necesaria para efectuar el diseño, esto es muy importante, sobre todo en compañías de gran importancia. El personal que desempeña las funciones anteriores ha sido previamente entrenado para este objeto.

El departamento de producción debe tener tarjetas en las que se indique el número del artículo, nombre del vendedor y algún otro dato descriptivo de cada una de las piezas indicadas en los impresos del vendedor. La tarjeta es elaborada de acuerdo con las especificaciones originales del equipo. Se deberán añadir algunos otros datos a las tarjetas en caso de que algún equipo en particular tenga relación con otros equipos. Mediante la revisión continua de las tarjetas podrá conocerse el movimiento de los impresos a través de todos los departamentos.

Los impresos del vendedor deben revisarse y observar de que tengan la identificación adecuada. En caso de que ocurran algunas fallas en la identificación del equipo éstas deberán solucionarse en el departamento afectado. Por lo general, se pueden identificar los datos por inspección de la orden de compras o por las especificaciones originales.

Los impresos del vendedor pueden ser para uso preliminar, para ser aprobados por el comprador o como impresos certificados. Después de la identificación se podrá conocer a través de las tarjetas de registro si los impresos son para uso preliminar o para su aprobación. Los impresos certificados deben incluir la certificación del vendedor. Después de la determinación final, deberán sellarse los impresos con las palabras *Preliminar*, *Para aprobación* o *Certificados*. Independientemente del grado de importancia debe sellarse toda la información que proporcione el vendedor. Con este sistema se podrá evitar maltratar los impresos, ya que el personal de diseño podrá seleccionar las tarjetas con sólo ver los sellos correspondientes. Mediante este procedimiento se consigue tener el número correcto de cada elemento y el estado legal o status en los impresos del vendedor.

En las tarjetas de registro debe estar anotado el nombre de los departamentos. Los movimientos anteriores se hacen en el departamento de producción, en donde puede obtenerse la información solicitada al tiempo que se desee.

Los impresos del vendedor que están sujetos a aprobación futura, deberán manejarse en forma especial. Con frecuencia, los fabricantes dan instrucciones de detener la fabricación hasta en tanto sean aprobados los dibujos, por lo que a veces es necesario hacer una decisión rápida. El sistema de tarjeta abierta mencionada anteriormente tiene muchas ventajas. Se pueden asignar tarjetas de determinado color a los dibujos que estén sujetos a aprobación futura para indicar con ella la urgencia de la solución. Todos los dibujos o información sujeta a aprobación deben revisarse por los diseñadores o por grupos de especialistas. El ingeniero de proyecto deberá dar el visto bueno para la aprobación final. Después de la

aprobación se regresan todas las copias al departamento de producción, para su archivo, o para futura distribución interna a los departamentos interesados y al vendedor.

El recibo de los impresos certificados finales del vendedor libera al cliente del respectivo diseño. Después de recibirse esta información se fija la fecha para la construcción del equipo. Toda esta información debe registrarse y manejarse en forma similar a la antes descrita.

Otra función del Departamento de Producción es la eliminación física de toda la información que no se utiliza y que fue proporcionada por el vendedor. Esto a veces presenta algunas dificultades, ya que en ciertos casos el personal de diseño considera adecuado retener alguna información. Es común permitirle a cada diseñador, sin control alguno y por corto tiempo, la retención de su correspondiente legajo. La información eliminada deberá destruirse y solamente el Departamento de Producción debe archivar desde el primero hasta el último de los legajos; además, sólo las personas interesadas podrán eliminar impresos.

Procedimiento de dibujo

Los dibujos que son necesarios para la construcción y diseño, elaborados por especialistas o por dibujantes técnicos, deberán ser del mismo tipo. Los ingenieros de proceso y de proyecto necesitan asistencia técnica en la preparación de diagramas de flujo, croquis y trazo de planos.

No es necesario hacer dibujos del equipo estándar que se compra a los fabricantes. El ingeniero especialista obtiene a través del vendedor de equipo los impresos certificados y se los proporciona a los grupos encargados del diseño. En estos equipos se incluyen bombas, compresoras, motores, instrumentos, hornos e intercambiadores de calor (si éstos se compran directamente al fabricante).

Para hacer las decisiones y los cálculos necesarios para el diseño, se requiere de los dibujos de tuberías, recipientes, estructuras de acero, cimentaciones, sistemas eléctricos e instrumentación. En este capítulo se indican algunos métodos típicos para la elaboración de los dibujos y en general de los dibujos de la planta de proceso.

Diseño de tuberías

Por lo general, el dibujo de tuberías se hace con líneas simples, con excepción de los tubos grandes (12 plg o más) éstos se trazan con líneas dobles para mostrar el diámetro del tubo. En los dibujos se dan detalles y notas referentes a las especificaciones del tubo, se indican los lugares donde se tienen flexiones, así como también conexiones con accesorios. En los dibujos se usan símbolos y raras

veces se muestran detalles de los accesorios. El diámetro de las bridas se dibuja a escala, de tal manera que podrán determinarse rápidamente los espacios de que se dispone. Se usan símbolos convencionales para describir válvulas. Dependiendo de la práctica a seguir, podrán o no mostrarse las dimensiones entre cara y cara de las válvulas.

La escala que se usa en los dibujos de tuberías es variable. Si se usa escala pequeña tal como ¼ de plg = 1 pie, dará como resultado tener un dibujo muy congestionado sobre todo cuando se trata de un proceso complicado. Se usa escala de ¼ de plg para tuberías extraordinariamente grandes de 6 plg o más. Para el caso de tuberías más pequeñas pueden elaborarse detalles a una escala mayor. Muchas compañías insisten en que se use una escala mínima de ⅜ de plg en los dibujos de tuberías.

Las tuberías pueden fabricarse en el taller o en la obra. Todas las tuberías de 2½ plg son enroscadas y fabricadas en la obra. Las tuberías de 3 plg o más, por lo general van soldadas y unidas con bridas y, por lo tanto, son fabricadas en la obra.

A cada una de las piezas fabricadas en el taller se le pone el número de serie indicado en los dibujos de montaje preparados por el cliente. Por lo general, en el número de la pieza se incluye el número del dibujo en el cual ésta es mostrada. Los números de las piezas pueden listarse en forma tabulada o en cualquier forma reproducible. Hasta después de recibir la lista de números de las piezas se procede a su fabricación.

Cuando el sistema de tuberías es construido en el taller, se reducen considerablemente los detalles y las dimensiones en los dibujos, debido a que en el mismo taller se preparan hojas llamadas dibujos de detalles para usarse exclusivamente en el taller. Por lo general, estas hojas no están sujetas a la aprobación y revisión del cliente, con excepción cuando se trata de tubos de cierta aleación o tratamiento térmico. La revisión completa de todas las hojas de detalle constituye en sí la revisión de todos los dibujos de la tubería. Ya que en el taller se preparan los detalles para ajustarse a los dibujos de montaje preparados por los diseñadores (del cliente), los errores posibles causados en la fabricación y debidos a la inexactitud de los detalles, originarán cambios en la obra, dichos errores deberán ser pagados por la empresa dueña del taller.

El diseñador de la planta de proceso prepara los dibujos en donde se muestran los arreglos y localizaciones, en el taller donde éstos se construyen se dibujan esquemas mostrando detalles, no así dibujos de montaje. El cliente podrá revisar las facturas de la tubería empleada en la fabricación correspondiente, con frecuencia la tubería se compra con base al tonelaje, en cuyo caso cada entrega de tubos debe ser pesada en una báscula pública con certificación

de pesos bruto y neto. En caso que el costo se estipule por pieza, la facturación debe incluir el costo del material, de la mano de obra y de los croquis elaborados en un taller.

ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN TUBERÍAS

Para esta parte del diseño, sólo se requieren simples croquis. El personal encargado del diseño de soportes de tuberías, marca en los dibujos de la tubería de uso propio, la localización de anclajes y soportes y de las fuerzas que en ellas actúan. No es común reproducir dibujos en los cuales se indiquen las fuerzas que actúan. Por medio de símbolos se indican los puntos de anclaje de la tubería en los lugares respectivos.

Con frecuencia, se elaboran esquemas de los diferentes tipos de juntas mecánicas de expansión, esto bajo la dirección del personal de este grupo; en los mismos esquemas se indican las dimensiones (no la información del vendedor), cargas axiales existentes y características de esfuerzos. El fabricante proporciona dibujos de taller o bien hojas con información, ya que ciertos datos solamente él podrá proporcionarlos. Después de obtenida toda la información así como los dibujos, podrán darse los datos finales de las juntas de expansión para su montaje posterior.

SOPORTES DE TUBOS

En los dibujos de la tubería se indican, mediante símbolos o números, los diferentes tipos de soportes, tales como zapatas y soportes colgantes (véase Cap. 18). Estos números están indicados en hojas estandarizadas. En caso de tener cargas extraordinarias en los anclajes y soportes, el personal que diseña las estructuras deberá hacer una revisión de estas fuerzas. Por lo general, se tienen ya las listas elaboradas de los materiales necesarios para las diferentes uniones de tuberías.

MATERIALES PARA TUBERÍAS

Para la elaboración de la lista de materiales y accesorios que se tienen en la tubería, se necesita tener cierta cantidad de croquis o bosquejos de la misma. En la lista de materiales deben incluirse válvulas y algunos otros accesorios de tubería, tales como tornillos y materiales para empaques. La lista de materiales se limita a la de los trabajos que se efectúan en la obra, ya que para lo fabricado en el taller el personal de éste elabora sus listas. Se debe hacer una lista completa de materiales cuando la tubería se fabrica totalmente en la obra, y en el supuesto caso de que el personal que efecúe el montaje pertenezca también al personal de diseño de la planta de proceso.

Diseño de recipientes

Los depósitos de presión, tanques, tambores, columnas de destilación y demás equipos de separación, se diseñan y construyen de acuerdo a los códigos descritos en el Cap. 12. En los códigos se especifican materiales, esfuerzos por temperatura y reglas para construcción.

El cliente debe elaborar un dibujo esquemático en el que se muestren el diámetro y la longitud de la cubierta, localización, tamaño y tipo de conexiones o salidas, espesor y tipo de los materiales para la cubierta y los cabezales, accesorios internos y externos necesarios en el recipiente y condiciones de operación para el diseño. Ya que el diseño del recipiente implica el cálculo de los esfuerzos causados por las cargas del viento que se tienen en torres verticales, deberá especificarse el diámetro y el número necesario de tornillos para efectuar el anclaje. Los dibujos esquemáticos de los recipientes deberán satisfacer las necesidades pedidas en el diseño.

Las partes interiores del recipiente, tales como las artesas o bandejas de las torres de destilación, son por lo general diseñadas por otras compañías especializadas, el diseño se produce después de conocer las necesidades del proceso. Esto es particularmente cierto cuando se utilizan artesas de acero inoxidable o de determinada aleación. Sin embargo, los diseñadores de estos recipientes pueden elaborar croquis de las bandejas de acuerdo a las necesidades del proyecto. Para algunos otros equipos interiores, tales como dispositivos para mezclar, los ingenieros que diseñan el recipiente diseñan también su soporte y la localización de éstos, los mismos ingenieros elaboran dibujos esquemáticos de los detalles del aislamiento necesario en el recipiente.

El fabricante de recipientes se responsabiliza de la construcción de los mismos de acuerdo con códigos apropiados y a las especificaciones solicitadas. Debe, en efecto, garantizar que se satisfagan las condiciones de presión y temperaturas de trabajo. Por lo tanto, el fabricante debe revisar el diseño del comprador.

Los dibujos de taller para la fabricación de recipientes, debido a que son elaborados por el mismo fabricante, los usa también el vendedor a quien, por lo general se los solicitan los compradores para su aprobación y futura construcción.* Por lo general se requiere de un determinado periodo de tiempo contado desde que se efectúa la primer consulta, hasta el inicio de la fabricación del recipiente, esto es debido a que debe diseñarse la disposición o trazo de tuberías y las conexiones deben fijarse antes que las toberas del recipiente se coloquen y orienten en su lugar. Para recipientes muy

* Después que los dibujos hayan sido aprobados se informará al fabricante para que proceda a la fabricación del equipo respectivo.

grandes este tiempo es fijado por el fabricante del recipiente a fin de preparar placas, cabezales y accesorios correspondientes.

Diseño de las estructuras

La localización del equipo en el interior de la planta debe basarse en el proceso, en la seguridad o en las necesidades del mantenimiento. Por lo tanto, son de naturaleza secundaria las estructuras, soportes, cubiertas y cimentaciones, y su diseño dependerá de la distribución del arreglo que se haga interiormente con las partes del equipo de proceso.

El diseño de las estructuras, por lo general se basa en las normas indicadas en el manual de práctica publicado por la American Institute of Steel Construction (véase el Cap. 23). El diseñador de la planta de proceso o el cliente, deben preparar bosquejos esquemáticos o dibujos unifilares en donde sean mostrados tamaños y puntos de conexión de todos los miembros estructurales. A estos puntos de conexión prácticamente se les conoce como puntos de trabajo.

La información debe incluir puntos, tales como cubiertas de acero, claros mínimos, dimensiones de barandales, límite de los enrejados en el piso, escaleras, elevadores y plataformas o soportes de algunas otras conexiones.

El vendedor o el fabricante de estructuras, utiliza los dibujos del cliente para estimar el peso, a fin de producir una cotización y para elaborar los dibujos de taller. Cada pieza de acero debe ser detallada a fin de fabricarse en el taller. La práctica a seguir es similar a la seguida por el fabricante de las tuberías. Con frecuencia, las estructuras de acero se venden de acuerdo a lo que pesan. El precio final es generalmente determinado de acuerdo al peso del material embarcado. Cuando las órdenes se basan en la suma global o total, los dibujos del cliente deberán estar completos al tiempo de solicitar la cotización respectiva.

Además de los detalles estructurales el fabricante de las estructuras elabora los dibujos para el montaje de las mismas, utilizando procedimientos estándar seguidos en la industria. Estos dibujos los utiliza el cliente para el montaje. Los dibujos de taller del vendedor, generalmente no están sujetos a la aprobación o revisión del cliente, a menos que el vendedor requiera de la aprobación del cliente para hacer algunos cambios en el tamaño de algún miembro de la estructura. Los cambios se hacen necesarios a fin de proporcionar claros para escaleras o tuberías. Sin embargo, al cliente se le suministran estos detalles, para su uso o para archivo.

Es conveniente apuntar que las prácticas seguidas en la construcción de edificios ordinarios, no son las mismas que para el caso del diseño de una planta de proceso. Por lo mismo, el fabricante, al hacer cambios en un miembro estructural, lo hará con un miem-

bro de mayor o igual resistencia que el original. Así el cliente deberá aprobar *a priori* los cambios necesarios en las estructuras de la planta de proceso.

En los dibujos unifilares preparados por el cliente, se deberá especificar el tipo de fabricación a emplear (remaches, tornillos o soldaduras), y las especificaciones en cuanto a galvanización o pintura. Cuando se requiera de partes galvanizadas, esto afectará a los dibujos del cliente ya que varias de las conexiones generalmente hechas en la obra, deberán hacerse en el taller antes de su galvanización. No se permite soldadura en la obra, ya que ello destruiría la galvanización. Si se hacen algunos cambios deberán quitarse las partes afectadas para volverlas a galvanizar.

Diseño eléctrico

Los diagramas de los circuitos de la planta de proceso, se preparan en forma esquemática y unifilar, para mostrar todo el equipo eléctrico, distribución de la carga, transformadores y mecanismos de control. Los encargados del diseño eléctrico, utilizan estos diagramas para distribuir y mostrar con detalle todos los conductos y equipo accesorio. Se asignan números o símbolos a todos los tramos de conductos, circuitos y equipo.

Además de los dibujos de detalles que muestran tramos de conductos y conexiones, en los esquemas se pueden listar con un número a todos los circuitos y conductos, estiramiento adecuado, longitud y tamaño del conducto, longitud y tamaño del cable. Se pueden preparar otras tabulaciones que muestren la secuencia apropiada para la instalación de aparatos de control de potencia.

Los dibujos para la instalación eléctrica, son meros esquemas sin dimensiones, excepto los detalles que muestran puntos terminales de tramos de conducto, disposición de conductos en los bancos, entradas de conductos a edificios o arreglos exactos, necesarios de efectuar para tener cierto espacio. Para hacer estos dibujos se necesitan planos de las áreas correspondientes, así como también dibujos certificados dados por el vendedor de todas las conexiones eléctricas del equipo requerido.

Por lo general, los dibujos eléctricos preparados por el diseñador de la planta, se usan para montaje de la planta y para elaborar la lista de materiales. Casi todo el equipo eléctrico se obtiene a través de descripciones que se dan por escrito.

Ingeniería de instrumentación

Los dibujos del diseño para instalación de la instrumentación, son muy similares a los que se hacen a instalaciones eléctricas, son esquemas y se usan principalmente para determinar la lista de

materiales. También se muestran en esquemas los detalles de la instalación correspondientes a instrumentos conectados directamente a algún equipo o para instrumentos localizados en un centro de control. Estos últimos dibujos son de dimensiones pero no necesariamente trazados a escala. Se preparan tabulaciones, similares a las que se tienen en instalaciones eléctricas, para todos los instrumentos de los circuitos de control, tanto eléctricos como neumáticos. Para la elaboración de los dibujos se necesita de la información del vendedor del equipo así como los planos de las áreas correspondientes.

Escalas usadas en dibujos

En muchas compañías se pierde mucho tiempo cuando arbitrariamente se asigna una escala fija a ciertos tipos de dibujos sin tomar en cuenta el diseño o estudio correspondiente. No hay duda de que la escala fija se derivó de ciertas prácticas de arquitectura para las cuales se utilizaba como calca una hoja sobrepuesta a fin de revisar inerferencias. Este procedimiento es raramente practicado en los dibujos de plantas de proceso, en los cuales se usa la escala en forma precisa (medición). En dibujo de tuberías, una escala muy usada es ⅜ plg = 1 pie. La escala legible próxima menor es la de ¼ plg = 1 pie. Para dibujos muy congestionados la escala ⅜ plg puede resultar muy pequeña. La mejor escala será aquella que pueda proporcionar una idea clara mediante un dibujo adecuado en el cual se ilustre gráficamente toda la información.

En cuanto al tamaño de los dibujos, dependiendo del área del papel, se podrán tener algunas economías en el costo de su impresión. Un dibujo altamente congestionado, ocupa completamente cada pulgada cuadrada de espacio, pero se perdería mucho tiempo en su interpretación, tal es el caso de la escala de ¼ plg, en este caso resulta muy ineficiente la revisión de la lista de materiales y de montaje.

Los dibujos de una planta de proceso, no requieren de la precisión absoluta que se necesita para el diseño de una máquina. Para casi todos los trabajos de diseño, el uso de los dibujos a escala se limita a determinar dimensiones. Casi todos los dibujos de una planta de proceso, deben hacerse a cierta escala, a fin de mostrar tamaños relativos y localización del equipo y no se justifica o requiere de una precisión extrema, a menos que se trate del diseño de un equipo mecánico. La mayoría de los dibujos de diseños de plantas de proceso se utilizan para fines de montaje más que para manufactura.

Las líneas del centro del equipo se trazan con la precisión que lo permita la escala, de manera que las discrepancias no sean acu-

mulativas. En los dibujos se muestran todas las dimensiones necesarias para el montaje, construcción o espacio necesario. El uso de una escala es sólo para fines de estimación. Es obvio que con escala de ⅜ plg = 1 pie, resultará impráctico tener aproximaciones menores de una a dos pulgadas.

Técnicas modernas de dibujo

Aun cuando se tienen muchos avances en todas las ramas de la ciencia, se han tenido pocas mejorías en la elaboración de los dibujos, función básica de todas las ingenierías. Aún no se han ideado métodos que eliminen completamente el concienzudo manual del procedimiento para dibujar. El costo del trabajo por dibujos correspondiente a una planta de proceso llega algunas veces al 5% del montaje total de la planta. Es, por lo tanto, muy importante utilizar procedimientos que ahorren tiempo en esta fase de la ingeniería, particularmente para compañías contratistas que proporcionan servicio de ingeniería a la industria.

Desde que se inventaron las copias heliográficas, el cambio principal que se ha hecho en tal procedimiento de dibujos es la sustitución de las técnicas con lápiz por las de dibujos entintados. En décadas anteriores, los dibujos para reproducción se hacían primero a lápiz, después se entintaban. Las mejoras que se han conseguido en procedimientos de dibujos, materiales y procesos de reproducción, permiten obtener impresos con dibujos hechos con lápiz iguales a los impresos de dibujos hechos con tinta. Pocas compañías utilizan la tinta para los dibujos excepto algunas veces para el diagrama final de flujo o para los dibujos de ciertos estándares.

Los dibujos hechos en hojas de papel lino, resultan de uso más satisfactorio en cuanto a su reproducción, que cuando se utiliza papel calca, esto tiene ventajas cuando se tienen condiciones severas de servicio en la planta. La mayor superficie de trabajo de las hojas de lino, ahorra tiempo que justifica el mayor costo de las mismas.

Las compañías más progresistas usan un gran número de métodos industriales de reproducción para el impreso de sus dibujos. Con el proceso de impresión *offset* se tienen muchas posibilidades de ahorro de tiempo. Con este proceso, se pueden dibujar sobre hojas de lino los detalles e instrucciones en lugar de dibujarlos a mano.

Con frecuencia, los detalles son impresos en hojas pequeñas y distribuidos junto con dibujos estándar de gran tamaño. Aun cuando se economiza tiempo en dibujar, debe hacerse referencia a estas hojas y lleva algo de tiempo la impresión y manejo de dibujos adicionales. Los detalles pueden reducirse en tamaño por un proceso fotográfico simple y ser después reproducidos en las hojas de

dibujo mediante el proceso de impresión "offset". Aunque se puede reducir el tamaño, las reproducciones pueden ser legibles. El mismo procedimiento puede usarse para reproducir hojas de catálogos, dibujos del fabricante o cualquier dato descriptivo necesario para el montaje de la planta.

En general, cualquier detalle que pueda imprimirse sobre un dibujo original, ahorrará muchas horas de trabajo. La mayoría de las empresas utilizan casi todos los métodos de impresión y reproducción. Debe revisarse cualquier detalle que en forma manuscrita se agregue al dibujo. Por lo tanto, los datos impresos resultan ser a un costo menor.

Se utiliza una máquina similar a las máquinas de escribir, para poner notas adicionales estándar en los dibujos, eliminándose con esto el trabajo laborioso de escritura a mano y elaboración de listas en los dibujos. Cualquier mecanógrafo puede recibir entrenamiento para operación de estas máquinas de tal modo que se puede tener una posible reducción en el costo. Estas máquinas debidamente usadas se pagan varias veces en muy pocos meses.

Indudablemente que muchas de las compañías que ofrecen servicios de ingeniería a la industria, sacan mucho provecho de las investigaciones que se hacen en cuanto a métodos de reproducción de dibujos. Con el costo aproximado de $0.07 por minuto por persona que se paga al personal de dibujo, cualquier método con posibilidades de ahorro, será recibido con mucho beneplácito por parte de la empresa correspondiente.

PARTE II

NEGOCIOS Y PROCEDIMIENTOS LEGALES

El ingeniero de proyectos no sólo trabaja con problemas técnicos, sino también se relaciona con operaciones de adquisición, procedimientos de oficina e interpretación de contratos.

CAPITULO 9

OPERACIONES DE PROCURACION

Comprar a un costo razonable el equipo y materiales necesarios y entregarlos en tiempo apropiado es una de las fases más importantes de la construcción de plantas de proceso. Este trabajo es realizado por el departamento de procuración de una organización de ingeniería, pero no sin la ayuda y consejo del ingeniero de proyecto. Aun cuando en el campo de proceso muchos agentes de compra tienen experiencia en ingeniería, es imposible esperar que estén bien informados en todas las fases de la tecnología. Por consiguiente, siempre que se requiera un juicio sobre ingeniería, ellos necesitan buscar el consejo del ingeniero de proyecto. De la misma manera, el ingeniero de proyecto debe depender del departamento de compras para estar al día en información acerca de precios y productos, contactos con vendedores y, sobre todo, para la procuración de materiales dentro de calendario. Por lo tanto, para la procuración de la construcción de una planta de proceso, es importante estar familiarizado con la organización y operación de un departamento de compras.

La procuración para un proyecto de planta de proceso es diferente de las operaciones de compra requeridas por una planta manufacturera, en donde el proceso de compra sólo cubre relativamente pocos productos estándar, de los cuales se compra una cierta cantidad a intervalos regulares. El personal encargado de las compras para un proyecto de planta de proceso debe tener una expe-

riencia más amplia, y debe estar enterado de posibles fuentes para muchas clases más de equipo.

ORGANIZACION Y OPERACION DE UN DEPARTAMENTO DE PROCURACION

La NAPA [National Association of Purchasing Agents (Asociación Nacional de Agentes de Compras)][5] ha recomendado una variedad de organizaciones para los departamentos de procuración. Una organización típica de procuración en la construcción de una planta de proceso puede estar constituida por un agente de compras (gerente de compras), uno o varios ayudantes del agente de compras, compradores, empleados de oficina y mecanógrafos. El agente o gerente de compras, con el auxilio de su ayudante, formula la política de compras y dirige las muchas funciones del departamento.

Existen, en uso común, dos métodos de compra: compra por contrato y compra por especialidades.

Compra por contrato versus compra por especialidades

Para el proyecto de planta de proceso, la procuración generalmente se hace por los métodos de contrato o de especialidades, o por una combinación de ambos. En la compra por contrato, uno o más compradores son asignados a un proyecto específico (contrato). En la compra por especialidades, cada comprador maneja determinados materiales o equipo con independencia del proyecto para el cual se van a usar. Ambos métodos tienen sus ventajas.

El sistema de compra por especialidades se usa con mayor frecuencia en organizaciones grandes que manejan varios proyectos. Los compradores por especialidades tienden a volverse especialistas en el renglón especial al que se dedican, y pueden quedar informados de los cambios en ese campo. El que dicha especialización sea o no necesariamente deseable, o pueda ser utilizada al máximo en provecho de la procuración para el proyecto en construcción, es materia de controversia. Cuando se usa la compra por especialidades, uno o más coordinadores de proyecto deben ser designados de manera que la procuración siga un calendario o programa definido.

Si bien un sistema de compra por contrato requiere compradores más versátiles, o más ampliamente experimentados, tiene ciertas ventajas en lo que se refiere a que los compradores toman más interés en el contrato particular y pueden, así, estar más capacitados para desarrollar esfuerzo de conjunto o trabajo de equipo.* Por lo general, la compra por contrato se adapta mucho mejor a la organización más pequeña.

---

* Esto supone que entre los distintos compradores que trabajan en los diferentes contratos se evita la indeseable competencia.

La compra por especialidades es más eficiente cuando la política de la organización permite la sobrecompra. En tales casos, grandes cantidades de un material dado pueden ser compradas con descuentos. Sin embargo, de este método derivarán problemas de sobrantes, a menos que la organización esté preparada para almacenar los materiales en exceso. El cuidado apropiado de estos materiales sobrantes, su flete, manejo y almacenamiento, significan costos adicionales, no siempre cargables al contrato particular. Generalmente, el comprador de la planta estipula que todos los materiales o equipo deben ser "nuevos". Si una firma contratista es el primer comprador, el cliente puede presentar cierta objeción al empleo de material o equipo almacenado en exceso. Esto es particularmente cierto en el caso de determinados renglones, como válvulas u otro equipo que puede oxidarse y parece entonces haber sido ya usado.

Procuración de equipo que requiere la participación de ingeniería

Pocos materiales básicos pueden ser comprados sin la preparación de planos, ya sea por el departamento de ingeniería del comprador o bien por el del vendedor. Una de las razones primordiales para la preparación de planos es la de ayudar en la procuración de materiales o equipo proporcionando representaciones concisas y fácilmente entendibles de los datos de diseño.

La fase comercial, o de compra, y la fase de ingeniería nunca deben ser separadas completamente. Por lo general, es necesario continuar la participación de ingeniería hasta la fecha de colocación del pedido de equipo especializado de operación, tal como bombas, compresoras, equipo de distribución eléctrica e instrumentos.

Las especificaciones y planos para equipo de proceso, que constituyen los datos vitales de procuración, deben ser preparados por los grupos de ingeniería. En este trabajo los ingenieros generalmente encuentran la ayuda de los ingenieros de ventas, la cual es muy valiosa en las etapas preliminares de desarrollo de especificaciones. De hecho, algunas veces es más práctico, dependiendo del enfoque del proyecto, que los grupos especilizados de ingeniería* desarrollen el diseño y selección final de equipo, tal como bombas e instrumentos, directamente con el vendedor. El departamento de procuración en-

* Quizá uno de los errores más comunes, y generalmente caros en las decisiones de ingeniería, es la tendencia a diseñar cada renglón individual sin considerar la disponibilidad de materiales, equipos o costos. El único remedio es la experiencia. Los ingenieros de proyecto, o bien deben tener un amplio conocimiento de las prácticas del fabricante, o bien tener a la disposición de ellos la experiencia combinada de diversos especialistas. Muchas organizaciones de ingeniería reconocen esta necesidad y entrenan a su personal en líneas especializadas. De esta manera, el ingeniero de proyecto puede depender de la experiencia de especialistas para especificaciones precisas, que satisfagan los requerimientos de proceso, pero que caigan todavía dentro de un modelo económico. (Véase el Cap. 8.)

tonces sólo maneja las operaciones comerciales y trámites de escritorios finales, dado que la cotización habrá sido decidida antes.

Para el mutuo beneficio, tanto de los vendedores como de los compradores, se recomienda restringir el número de empleados autorizados para tratar con vendedores. Si esto no se hace, la situación se vuelve irremediablemente confusa. Además, es necesario que los ingenieros que establecen contacto con los vendedores estén enterados de la terminología comercial y de los aspectos legales de los presupuestos, con objeto de asegurar cotizaciones correctas.

Procuración de materiales de línea

Los materiales comúnmente manufacturados, o de línea, de ordinario son manejados por el departamento de procuración, ya que la colocación de pedidos para este equipo usualmente es un asunto rutinario de precio y entrega, una vez que las especificaciones y los datos están completos. El número de fabricantes aceptables para los renglones comunes, tales como materiales de tubería, a menudo representa un problema. Si existen muchos fabricantes conocidos y confiables, el continuar enviando solicitudes de cotización para el mismo tipo de equipo a todas las fuentes aceptables, significa desperdiciar el tiempo. Un análisis de las ofertas de todos los fabricantes aceptables debe ser una base suficiente para la colocación de pedidos sucesivos con el mismo vendedor hasta que la estructura del precio cambie de manera significativa. Sin embargo, los pedidos abiertos o acuerdos para comprar todo un tipo de material a un fabricante dado, no deben ser hechos por periodos prolongados, inclusive en un solo proyecto. Las operaciones de procuración en una planta grande de proceso por lo general continúan al menos durante un año, y los precios pueden fluctuar en ese tiempo. El departamento de procuración debe conocer las tendencias de precios y reservarse el derecho de obtener beneficios de estos cambios en favor de su economía.

Expeditación e inspección

Con frecuencia la expeditación e inspección de un proyecto están dirigidas por el departamento de procuración. No obstante, la función primordial de la expeditación de un proyecto es acelerar el movimiento de materiales para cumplir con el calendario de construcción, y no necesita estar dirigida por quienes se encargan de las operaciones de compra.

PROCEDIMIENTOS DE PROCURACION

Los procedimientos de procuración para un proyecto de planta de proceso pueden ser divididos en varias fases.

1. Solicitud de cotización — Petición formal de una cotización o de un precio.

2. Cotización — Respuesta formal a la petición de precio.

3. Comparación de ofertas — Estudio objetivo de todas las cotizaciones recibidas respecto a un renglón dado.

4. Orden de compra — Pedido formal que se envía a la mejor propuesta.

5. Inspección — Examen de materiales durante la fabricación y a la terminación, con objeto de asegurar la más alta calidad.

6. Expeditación — Aceleración, por parte del comprador, del avance en la manufactura de equipo.

SOLICITUD DE COTIZACION

Las operaciones reales detalladas de la fase de solicitud de cotización son: (*a*) acumulación de datos en la forma de especificaciones o planos, (*b*) selección de los vendedores a quienes se va a dirigir la solicitud de cotización, y (*c*) mecanografía y envío. El renglón (*a*) es responsabilidad de ingeniería, (*b*) se desprende de experiencias anteriores o de desarrollos de ingeniería, y (*c*) es una operación de oficina.

Muchas compañías tienen formas estándares de solicitud de cotización. Para evitar confusiones, dicha forma en todos los casos tiene claramente impresa la advertencia: *esta solicitud no es un Pedido*. Cuando procede, se anexan dibujos y especificaciones a la solicitud. Se describe el método de cotización y se hacen peticiones de la promesa de fecha de entrega, de las condiciones de pago y de un desglose de precios. Se cita la fecha en la que se requiere la cotización, y se piden cotizaciones escritas.

El número de solicitudes formuladas para un renglón dado depende de la política de la compañía. Si la procuración está siendo efectuada para el cliente por una firma contratista, se deben acatar los deseos del cliente. De hecho, muchas firmas de proceso proporcionan contratistas con una lista de vendedores aceptables y especifican el número mínimo de solicitudes por formular. Tres cotizaciones es el mínimo usual, puesto que este número asegurará la selección de un vendedor sobre la base de precio, tiempo de entrega y calidad del producto.

Cotización

El vendedor presenta su cotizacion en una forma especial, en la cual se especifican varias condiciones y definiciones generales. Estas figuran impresas en letra pequeña, pero no deben ser ignoradas, ya que son parte legal del documento.

En la forma de cotización se mecanografía la información específica referente al equipo que se está cotizando, la cual debe incluir lo siguiente:

Cantidad y descripción del material que se está cotizando. La descripción puede ser breve en especial si se refiere a una especificación que dé una descripción completa. Adicionalmente, también se anexan literatura descriptiva y planos, si se considera que así se logra una mejor descripción del renglón considerado.

Precio. El precio debe proporcionarse tanto sobre la base de precio unitario (precio por renglón) como sobre la base de precio total (precio por número total de renglones y también precio por el pedido total).

Pesos estimados. Esta información es necesaria para hacer una mejor planeación de los métodos de embarque y para comparar diversas propuestas.*

Tipo de cotización. (*a*) Precio firme: El precio cotizado es obligatorio para el vendedor si se acepta dentro de un plazo dado (por lo general 30 días); (*b*) Cláusula de aumento: En la Segunda Guerra Mundial, durante los días de escasez inicial de materiales y costos indeterminables, muchas cotizaciones contenían cláusulas de aumento que permitían el ajuste ascendente de precios debido a los incrementos en mano de obra, materiales y transportes que pudieran presentarse entre la fecha de colocación del pedido y la fecha de embarque.

Descuentos comerciales y descuentos por volumen. Generalmente se conceden ciertos descuentos por volumen y descuentos aplicables a compradores que han de revender (como los contratistas). El monto del descuento debe darse en la cotización. Cualquier descuento que es tratado por el vendedor con el mayor sigilo, debe ser considerado con recelo.

El uso de descuentos comerciales sobre materiales listados en catálogos es particularmente ventajoso tanto para el vendedor como para el comprador. Una vez al año, o con menor periodicidad, puede imprimirse un catálogo en el cual se dan descripciones completas y los llamados precios de lista (que son precios por encima del precio real de venta, anticipado) para cada renglón. De esta manera, revisando la hoja de descuentos, y no todo el catálogo, el precio real puede ser variado para admitir cambios en los costos.

A menudo los descuentos se cotizan como una serie de descuentos porcentuales, tales como 20, 10 y 5. Para calcular el precio real, el precio de lista se multiplica por (100-Descuento)/100, o sea, en este caso, por 0.80, 0.90 o 0.95, respectivamente. Se utiliza una

* En adición a las dos razones que el autor menciona, es indispensable conocer el peso estimado de un equipo en los casos de importaciones o exportaciones del mismo, puesto que, en la mayoría de los casos, del peso, bruto, neto o legal de un renglón dado dependen los correspondientes impuestos aduanales. (N. del T.)

serie de descuentos, porque un solo descuento no puede ser aplicado a todas las situaciones, pero pueden idearse varias combinaciones de descuentos que sí sean aplicables.

Condiciones de pago. Deben mencionarse las condiciones de pago, incluyendo el monto del descuento en efectivo junto con las condiciones L.A.B.* (libre a bordo). Una declaración típica que implicara estos conceptos podría ser "2%, 10 días, 30 días neto, L.A.B. Filadelfia, Pa." Esto significa que si la factura es pagada dentro de los 10 primeros días se concede un descuento de 2% sobre el precio neto. En cualquier caso, el pago se puede hacer hasta los 30 días después de la recepción de la factura, debiéndose entonces cubrir el precio neto. El desaprovechar la ventaja del descuento en efectivo es una práctica comercial muy pobre, que puede ser fácilmente demostrada calculando la tasa equivalente de interés anual, suponiendo que el comprador elija esperar hasta el final del periodo de treinta días. En el caso del 2% a 10 días, el interés equivalente es 36%.[9]

En la Tabla 9-1, el término L.A.B. significa que la mercancía será entregada a bordo de los carros de ferrocarril, en Filadelfia, Pensilvania. El comprador debe pagar los gastos de transporte desde este punto hasta su localidad. Además, el título legal de la mercancía pasa al comprador en el punto L.A.B., y todas las pérdidas que ocurran en tránsito deben ser recuperadas del transportador por el comprador. En algunos casos las cotizaciones indican el punto L.A.B. y luego estipulan que el flete será descontado. En tal caso el comprador adquiere el título sobre la mercancía en el punto L.A.B., pero el vendedor paga los gastos de flete. Estos y otros términos de tráfico, tales como F.A.S. (libre a un costado del barco), los cuales se usan en la compra y embarque de materiales, deben ser perfectamente comprendidos por los responsables de las compras. Se dispone[3,6,8] de definiciones completas junto con las implicaciones legales sobre la materia. En la Tabla 9-1 se proporciona un breve resumen de estos términos.

Plazo de entrega. De lo más importante en muchos proyectos de construcción es el plazo esperado de entrega. En todas las cotizaciones debe aparecer la entrega aproximada, generalmente expresada en días, semanas o meses, contados a partir de la fecha del pedido.

En adición a los puntos esenciales anteriores, una cotización debe estar fechada, identificada por algún número y firmada por un representante autorizado de la compañía. Muchas cotizaciones tienen un espacio para ser firmadas por el comprador, lo cual las convierte, de hecho, en convenios legales de compra. Empero, en términos generales, la mayoría de las empresas prefieren emitir una orden formal de compra (véase más adelante).

* F.O.B. en el original (Free-on-board). (N. del T.)

TABLA 9-1. LISTA ABREVIADA DE TERMINOS COMERCIALES UTILIZADOS EN LAS COTIZACIONES

1. *C.I.F.*** Un término del comercio de exportación. El precio cotizado por el vendedor incluye el costo de la mercancía, seguro marino y todos los costos de transporte. En general los precios cotizados son en la moneda del país de destino.

2. *C. & F.* Lo mismo que C.I.F., excepto que el seguro no está incluido.

3. *En muelle.* El precio cotizado incluye el costo de la mercancía y costos adicionales requeridos para transportarla y luego descargarla en determinado puerto de importación, incluyendo el pago de derechos.

4. *En factoría, en fábrica, en bodega.* El precio cotizado es para materiales en su punto de origen (planta del fabricante).

5. *L.A.B.* Libre a bordo. El término L.A.B. debe calificarse para evitar malas interpretaciones.

5(*a*). *L.A.B.* (en transporte interior convenido). El precio cotizado incluye el costo de la mercancía y el costo de cargarla en el transporte. (Camión, carro de ferrocarril, etc.). La responsabilidad del vendedor sobre la mercancía no cesa sino hasta que ésta está cargada en el transporte.

5(*b*). *L.A.B.* (en transporte interior convenido) El flete está pagado hasta el punto convenido. El precio cotizado incluye el costo de la mercancía, su carga y su flete hasta el punto convenido. Sin embargo, el vendedor no asume responsabilidad por la mercancía después que ésta ha abandonado el punto de salida.

5(c). *L.A.B. Vapor* (en puerto convenido de embarque). El precio cotizado incluye el costo de la mercancía y su entrega en condiciones apropiadas a bordo de un vapor en un puerto convenido de embarque. La responsabilidad del vendedor por la mercancía no cesa sino hasta que ésta ha sido puesta a bordo del vapor.

5(*d*). *L.A.B. Fábrica.* Un término no muy bien definido. Puede significar que el carretaje a la estación de ferrocarril debe ser pagado por el comprador. El término debe ser evitado.

6. *F.A.S.**** *Vapor* (en puerto convenido de embarque). Libre a un costado del vapor, en puerto de embarque. El precio cotizado incluye el costo de la mercancía y los gastos de transporte y descarga necesarios para entregar la mercancía dentro del alcance del aparejo de carga de los barcos.

Comparación de ofertas

Después que las ofertas o cotizaciones han sido recibidas, se puede seleccionar más adecuadamente al vendedor preparando una tabulación y análisis de los diversos factores significativos de cada cotización. Los factores que deben ser considerados son:

1. Especificaciones
2. Precio y cláusula de aumento
3. Entrega
4. Condiciones de pago
5. Condiciones generales (política)
6. Garantía
7. Fletes

** C.I.F., literalmente significa *Cost, Insurance and Freight* (Costo, Seguro y Fletes). (N. del T.)

*** F.A.S., *Free along side* en el original. (N. del T.)

8. Cláusulas laborales (mano de obra de fabricación)
9. Método de embarque

El ingeniero de proyecto debe anotar y evaluar todas las características de diseño. Cuando se hace un análisis detallado y se comparan en una tabulación ordenada las características de oferta de cada vendedor, resultan con bastante claridad las diferencias que pudieran haber quedado ocultas.

Inclusive el precio requiere un estrecho escrutinio. Lo que pudiera parecer un precio bajo, puede, en realidad, ser alto si se compara sobre una base equivalente. Deben considerarse factores tales como costos de embarque, precios fijos o con aumento y condiciones (véase más adelante), y para poder compararse cada cotización debe ser ajustada a la misma base.

A menudo un pedido puede ser adjudicado a una determinada compañía porque, además de ofrecer un buen producto, su servicio técnico, su prontitud en proporcionar planos y su actitud general de asistencia, aunque quizá intangibles, contrabalancean sobradamente el ligero costo adicional.

Muchas compañías tienen formas estándares diseñadas para ayudar a tabular ordenadamente las ofertas. Todas las tabulaciones que requieran un criterio de ingeniería deben ser sometidas a la aprobación del ingeniero de proyecto. El departamento de compras debe ser particularmente cuidadoso en la indicación de todas las condiciones y factores de transporte, y debe señalar las diferencias que al respecto existan. Para facilitar la labor del ingeniero, con la tabulación deben suministrarse copias de las cotizaciones. Con frecuencia el ingeniero de proyecto del contratista someterá estas tabulaciones al ingeniero de proyecto del cliente para su aprobación.

La orden de compra

Una vez que el vendedor ha sido seleccionado, se emite una orden de compra basada en la cotización que ha resultado vencedora. Para dicho propósito se usan formas de órdenes de compra.*

En estas formas la información puede estar dividida en tres categorías: encabezado, parte principal y anotaciones estándares impresas. La localización de éstas en la orden de compra ha sido especificada por la Asociación Norteamericana de Agentes de Compras.[5]

ENCABEZADO. Contiene el nombre y dirección de la compañía y espacios para el nombre y dirección del vendedor, dirección a la que se ha de enviar el embarque e instrucciones relativas, punto L.A.B., condiciones de pago, fecha de la orden, número de serie de la orden de compra y fecha en que se quiere el material.

* También se usan ampliamente las formas para cambios (orden de cambio) en la orden original. El término *orden de cambio* debe estar impreso en lugar prominente de dicha forma con objeto de llamar la atención sobre los cambios y diferenciarla de la orden de compra original.

PARTE PRINCIPAL. La parte principal de la forma, precedida generalmente por una referencia a la cotización del vendedor, contiene el texto de la cantidad, descripción y precio de cada renglón individual. También se anota el precio total de la orden. Si la orden puede ser referida a especificaciones y dibujos, la descripción puede ser breve y las especificaciones y dibujos pueden ser anexados a la orden. Cuando se conoce, se debe anotar el peso aproximado de cada renglón individual, en atención a que esta información con frecuencia resulta de utilidad a receptores de copias de la orden de compra, tales como el departamento de ingeniería.

ANOTACIONES IMPRESAS. Impresas también en la orden de compra, figuran varias notas, términos y condiciones estándares de la orden. Estas anotaciones incluyen instrucciones para el envío de la guía de embarque (recibo de la compañía transportadora), de la lista de empaque (lista del contenido, dimensiones y peso de cada paquete o conjunto de paquetes de embarque), y de la factura (lista de partidas o renglones individuales embarcados, o bajo pedido, en la que se muestran los precios y otros gastos).*

Igualmente se proporcionan instrucciones para identificar todos los embarques, cartas y documentos con el número de orden de compra y con el número de partida de equipo. Es muy importante que el vendedor siga estas recomendaciones; de lo contrario, se causa un considerable retraso y confusión en la identificación de los materiales.

La forma de orden de compra debe también incluir todas las anotaciones estándares sobre la política del comprador impresas (no mecanografiadas) directamente en el documento original; de otra manera, se requerirían apéndices o anexos por separado. Cada papel individual representa un costo adicional de manejo y fácilmente puede perderse en dicho manejo. En la mayoría de las organizaciones de procuración se tienen las siguientes notas estándares.

Garantía. Para todo equipo y material comprado debe incluirse algún tipo de cláusula de garantía. Las extensas y elaboradas cláusulas de garantía generalmente requieren correspondencia adicional, con subsecuentes enmiendas o desistimientos. La mejor garantía es siempre la integridad del vendedor. La siguiente garantía es típica: "Todo equipo o material que se surta con base en este pedido, será garantizado por un periodo no mayor de doce (12) meses a partir de la fecha de entrega (o la fecha de operación o uso), contra fallas de operación provenientes del diseño del fabricante, o contra fallas mecánicas provenientes de la manufactura del fabricante, siempre y cuando el equipo o material se opere o use de acuerdo con las especi-

* Una transacción comercial ordenada depende de la pronta recepción de las copias fieles de todos los documentos mencionados. El personal de materiales del departamento de construcción utiliza las listas de empaque para verificar el material que entra. El departamento de contabilidad debe verificar las facturas contra la orden o pedido y turnarlas a la oficina del contralor para que sean pagadas.

ficaciones originales. Todas las partes o materiales que se encuentren defectuosos dentro del plazo especificado, serán reemplazados, sin costo para el comprador, L.A.B. planta del fabricante".

Un vendedor primario (quien recibe el pedido) no garantiza partes manufacturadas de equipo proporcionadas a él por otro fabricante, en mayor grado que el alcanzado por la garantía del otro fabricante. Generalmente, el vendedor primario reconocerá la cláusula de garantía estableciendo que la garantía global está limitada a las garantías de los subvendedores. Sin embargo, por estar en juego su reputación, los fabricantes aceptan una cierta responsabilidad moral sobre cualquier equipo por ellos vendido. De todas formas, en general ningún fabricante aceptará responsabilidad alguna por pérdidas económicas en la producción causadas por fallas de su equipo, y prácticamente todas las garantías se limitan a la sustitución de la parte que falla.

Inspección. Se debe incluir un párrafo que establezca, en efecto, que "todo equipo y material que se surta debe estar sujeto a inspección de taller y de campo por parte del comprador o sus representantes, y el vendedor debe notificar al comprador, con cuando menos ——— días de anticipación, la fecha de las visitas de la inspección de taller. Si el comprador no desea inspeccionar determinado equipo, el vendedor debe ser avisado en dicho sentido, pero en el entendimiento de que cualquier exoneración de este tipo sobre la inspección, de ninguna manera releva al fabricante de las responsabilidades expuestas en la cláusula de garantía". Otra cláusula que frecuentemente se emplea, estipula que "los inspectores o representantes del comprador deben tener acceso en todo momento a la planta o talleres del fabricante, con el propósito de inspeccionar el equipo durante el proceso de manufactura".

Calidad. Sobre la calidad de los materiales se incluye una declaración de este tipo. "Todos los materiales proporcionados o utilizados en la fabricación de los artículos comprados, deben ser nuevos y de primera calidad, y en concordancia exacta con las epecificaciones aplicables".

Cláusulas laborales. Una cláusula laboral típica podría ser: "El vendedor está de acuerdo en que toda la mano de obra usada en la fabricación de los artículos especificados que se surtan, deberá ser empleada y pagada bajo las reglamentaciones aplicables de la Fair Labor Standards Act† de 1938 y sus adiciones subsecuentes o futuras. El vendedor también está de acuerdo con que todas las facturas remitidas al comprador deben exhibir una certificación escrita de su observancia con las reglamentaciones anteriores".

Existen varias leyes con respecto a prácticas discriminatorias. Antes de fincar un pedido con firmas desconocidas, se debe investigar

† Se podría traducir como *Ley de estándares laborales justos.* (N. del T.)

el área particular en la cual se va a efectuar el trabajo y el tipo de mano de obra que se va a emplear. Graves dificultades pueden derivar del empleo de una firma no sindicalizada* si el equipo está siendo montado por trabajadores sindicalizados.** La tubería fabricada en taller puede ser fuente de muchas complicaciones laborales, en particular si el tubo no es fabricado en el área en donde se va a montar. Las especificaciones de tuberías deben incluir el requerimiento de un sello de certificación en cada tubo individual, en el que conste la asociación del fabricante con el sindicato laboral aplicable.

Cláusulas de subcontratista. Con frecuencia la orden de compra se utiliza como un medio para la colocación de subcontratos. En el subcontrato no es necesario que se repitan las anotaciones estándares que figuran en la orden de compra. Basta con estipular: "Cuando el equipo, materiales o servicios están siendo proporcionados bajo subcontrato, se aplicará la forma del subcontrato ejecutado, la cual pasará a ser parte de esta orden". En sí misma, la forma del subcontrato constituye legalmente un apéndice o anexo del pedido.

Instrucciones de embarque. Los puntos de origen y de destino del material cubierto por la orden de compra, deben ser anotados para usarse tanto por el vendedor como por el comprador. El método de transporte se selecciona, de ser posible, al principio de las negociaciones y debe ser indicado en la orden de compra. Cuando el tiempo es limitado, el comprador puede pedir embarque por camión, express de ferrocarril o express aéreo. Si los métodos de embarque no pueden ser decididos al momento de fincar el pedido, en éste se debe incluir la advertencia: "Las instrucciones de embarque se remitirán más tarde". Para equipo grande, el vendedor debe estar informado de los métodos de embarque a manera de poder planear el montaje del equipo por embarcar.

Protección de patente. Dado que la ley de patentes mantiene expuestos a una demanda judicial tanto al usuario de un material patentado como al vendedor que a sabiendas o por ignorancia invade la patente, para proteger al comprador en las órdenes de compra, se inserta una cláusula de protección de patente. Esta cláusula estipula que el vendedor compense al comprador, y/o al último usuario del material, por todos los costos que puedan surgir derivados de las demandas presentadas por la parte reclamante de la invasión de patente.[2]

Muchos otros términos especiales y condiciones peculiares de la transacción particular pueden ser incluidos como parte de la orden de compra. Todas estas anotaciones deben estar claramente redactadas y, sobre todo, deben ser las menos posibles. Al parecer, las cláusulas de protección del comprador deben limitarse a aquellas que lo protejan contra fraude y contingencias que estén fuera de

* *Open-shop firm,* en el original. (N. del T.)
** *Closed-shop workers,* en el original. (N. del T.)

su control. Ciertamente, nunca se idearán cláusulas tan hábilmente redactadas que protejan contra prácticas que son legales, pero, a pesar de todo, no éticas y perjudiciales. La mejor protección la constituye un fabricante honesto.

Orden de "aceptación"

Desde el punto de vista legal, la orden de compra se convierte en contrato únicamente después de ser aceptada por el vendedor. Por consiguiente, es una práctica común enviar al vendedor un documento de aceptación de la orden de compra, a modo de que él pueda firmarlo y retornarlo. Por parte del vendedor, el signatario debe ser un agente autorizado del fabricante.

INSPECCION

Una fase importante de la procuración para plantas de proceso, es la inspección del equipo durante su fabricación y a la terminación de la misma. Las ventajas obtenidas por la compañía compradora mediante un cuidadoso desarrollo de planos y especificaciones, pueden perderse por una manufactura descuidada y errores realizados en los talleres del fabricante. Por lo tanto, vale la pena que el comprador envíe a su inspector a la planta del vendedor, en particular cuando se trata de renglones principales del equipo. El privilegio de inspeccionar el equipo en la planta del vendedor generalmente se obtiene antes de fincar el pedido, y se hace figurar en la orden de compra. Ningún fabricante honesto negará los beneficios de la inspección, y muchos dan por bienvenidas las sugerencias de un inspector competente.

La tarea del inspector consiste en presenciar las pruebas efectuadas en equipo mecánico, como bombas y compresoras, en observar y aprobar métodos de fabricación de recipientes, tubería y acero estructural, y en fomentar la mejor elaboración del equipo que se está fabricando para la firma que lo emplea. El inspector debe ser una persona de considerables conocimientos prácticos y con habilidad para señalar errores y para congeniar con la gente. Una gran parte del trabajo de un inspector competente consiste en evitar los errores antes de que ocurran.

Los reportes del inspector son directamente para el departamento de compras. El ingeniero de proyecto debe ser notificado acerca del equipo rechazado, aunque en tales casos los ajustes son manejados por el departamento de compras. Si la inspección se hace en el sitio de la construcción, entonces se hacen los arreglos necesarios para reemplazar el material rechazado y para regresarlo al vendedor. En el caso de equipo como bombas y filtros, algunas veces es posible que el vendedor corrija las fallas en el campo. Para este trabajo el

vendedor envía, por cuenta suya, un representante técnico al sitio de la obra.

Debido al alto costo de la inspección, sólo los renglones principales de equipo se inspeccionan antes de su embarque. Renglones de línea, tales como válvulas e instrumentos, deben ser verificados al entregarse en el lugar de la construcción.

EXPEDITACION

La función primaria de la expeditación es asegurar, en el sitio de la obra y de acuerdo con el calendario del proyecto, la entrega de los materiales comprados. Materiales tales como válvulas y accesorios están disponibles en las bodegas del proveedor y pueden ser entregados en cualquier momento. No obstante, el avance de equipo especialmente diseñado, tal como recipientes a presión o compresoras grandes, debe ser seguido de manera continua por empleados del comprador, llamados expeditadores. Los fabricantes estiman las fechas probables de entrega para el equipo que se va a fabricar en sus talleres, pero estas estimaciones dependen de la pronta entrega de los materiales de sus proveedores, de la eficiente programación de sus trabajos de taller y de la oportuna recepción de los planos enviados por el comprador. El expeditador del comprador, siendo una persona que trabaja tanto con el fabricante como con su propia empresa, puede hacer mucho para lograr que se cumplan las fechas estimadas de entrega.

Su trabajo puede ser explicado más claramente describiendo el avance de un gran recipiente a presión, de acero, desde la etapa de solicitud de cotización hasta la entrega.

A tres o más fabricantes se envía una solicitud de cotización, la cual incluye especificaciones y un croquis preliminar del recipiente. Se proporcionan el diámetro del recipiente, espesor de lámina, tipo de tapa y fondo, y número y tamaño de espreas. A partir de esta información los vendedores están en posibilidad de desarrollar sus cotizaciones, en las que se incluyen los costos y el plazo estimado de entrega.

Durante el periodo de solicitud de cotización (dos o tres semanas), el trabajo de ingeniería procede en las oficinas del comprador, y en la fecha de colocación del pedido las especificaciones del material metálico, y el tamaño y espesor de la lámina del recipiente, han sido confirmados. Si se han efectuado algunos cambios, a la orden de compra se anexa un croquis revisado del recipiente. El fabricante es informado, por medio de una anotación, de que queda "autorizado a comprar todos los materiales requeridos sobre la base de los croquis preliminares". El expeditador recibe una copia de la orden de compra cuando ésta es enviada al vendedor y entonces se vuelve res-

ponsabilidad del expeditador el vigilar que la entrega se haga en tiempo.

Después que el fabricante ha sido avisado de proceder con la compra de materiales, el expeditador del comprador hace una visita al taller del fabricante y obtiene copias de todos los pedidos de materiales. Luego él verifica telefónicamente, o por visita personal, con la fundidora de acero para estar cierto de que ya se ha arreglado un determinado calendario de "rolado" para la lámina de acero. El también confirma las fechas de entrega de todos los otros equipos ordenados por el fabricante.

Cuando los materiales son entregados al fabricante, puede comenzar el "rolado" de la lámina para dar forma al casco del recipiente, aunque los fabricantes se rehúsan a efectuar trabajos adicionales hasta que reciben del comprador los planos del diseño final. Es difícil y costoso iniciar el trabajo relativo a un recipiente grande y luego verse forzado a descontinuarlo por un corto tiempo hasta que se hace algún cambio de diseño. El siguiente trabajo importante del expeditador es, por consiguiente, dentro de su propia empresa. El debe asegurarse de que el grupo de diseño del recipiente complete dentro del calendario los planos detallados finales, con objeto de que el fabricante no sufra retraso alguno.

Después que el fabricante recibe los planos finales y la fabricación comienza, el avance del trabajo puede ser reportado por el inspector del comprador, quien debe observar diariamente las operaciones de taller. El expeditador necesita visitar el taller únicamente de manera ocasional, pero continúa siguiendo el avance del recipiente hasta que éste es entregado. Cuando el reporte del inspector indica que el trabajo se está retrasando, el expeditador hará una visita al taller, determinará la causa del retraso y ayudará al fabricante a superarla. Si el fabricante tiene varios pedidos de otras compañías, el expeditador debe visitar el taller con mayor frecuencia para tener la certeza de que el trabajo de su empresa no se retrasa indebidamente por los trabajos de los otros pedidos.

En resumen, las obligaciones de un expeditador pueden ser brevemente descritas como sigue:

1. Acumular datos que puedan afectar la entrega.
2. Anticiparse a los retrasos y a los "cuellos de botella", y resolver éstos directamente con el vendedor.
3. Ayudar al vendedor a obtener prioridades.
4. Ayudar al vendedor en la resolución de sus problemas de procuración.
5. Cambiar los calendarios de entrega cuando sea necesario.
6. Sostener correspondencia con los subvendedores y proveedores del vendedor principal.

7. Estar al pendiente de cambios en los calendarios de ingeniería de su propia organización y, cuando sea necesario, pasar esta información al vendedor o fabricante.

8. Expeditar en su propia empresa la terminación, dentro de calendario, de planos vitales.

Aunque la entrega a tiempo es esencial, una entrega prematura puede ser desventajosa. Los materiales que se obtienen de línea no deben ser entregados sino hasta que se necesiten o, de lo contrario, se requerirán extensas facilidades de almacenamiento. El equipo especialmente construido, tal como un recipiente, deberá ser levantado dos veces si es que se entrega antes de que las cimentaciones estén listas. El expeditador, por consiguiente, debe ayudar a evitar dichas entregas prematuras.

Un expeditador debe tener un conocimiento práctico de los procedimientos de fabricación, métodos de procuración, fuentes de abastecimiento y prácticas de embarque. Además, debe poder trabajar de manera efectiva con la gente, tanto en su empresa como en la del fabricante. Puesto que su obligación primordial es animar a la gente a terminar a tiempo un trabajo, sus acciones deben ser diplomáticas con objeto de evitar resentimientos.

PRACTICAS GENERALES COMPRADOR-VENDEDOR

En las relaciones entre compradores y vendedores, las siguientes son prácticas comunes:

1. En general todas las transacciones entre comprador y vendedor deben ser sostenidas sobre una base formal, es decir, por escrito.

2. Las instrucciones a los vendedores siempre deben ser enviadas en forma de una orden de compra modificada o de un apéndice a la orden original. Este debe ser un documento similar a la orden de compra, llevar la firma del agente de compras e identificarse, mediante alguna designación numérica similar, con la orden de compra original.

3. Es buena política que únicamente el personal del departamento de procuración discuta precios, materiales o equipo con los vendedores durante la etapa de solicitud de cotizaciones. En atención a que no es ético revelar una oferta de un vendedor, mientras menos personas dispongan de esta información, menor es la oportunidad de una indiscreción accidental.

4. Después de que una oferta formal ha sido recibida, la renegociación de precios puede o no estar permitida. Generalmente esto es materia de política con el comprador. Si un vendedor descubre un error en la solicitud de cotización de un comprador, o por alguna razón consigue permiso de revisar su cotización, todos los otros vendedores participantes deben gozar del mismo privilegio.

5. Se debe dejar transcurrir suficiente tiempo para la recepción de ofertas, antes de decidir cuál de ellas es la más apropiada.

6. Una buena política es el solicitar que todos los cambios, adiciones o cancelaciones sean manejados únicamente por el departamento de procuración. Bajo ciertas condiciones, esta política puede requerir tiempo adicional, pero evita confusiones. Debe ser de la completa responsabilidad del departamento de procuración el negociar la parte comercial de un pedido (precio, condiciones y entrega), con independencia de los requerimientos técnicos.

Si el equipo está siendo fabricado de acuerdo con el diseño del comprador, el fabricante puede hacer varias preguntas técnicas que solamente puedan ser contestadas por el departamento de ingeniería. Una respuesta formal es expedida entonces por el departamento de ingeniería al de procuración con objeto de que éste la transmita al vendedor. De esta manera el departamento de procuración puede mantener toda la responsabilidad por todos los cambios de precio originados por las alteraciones de diseño.

7. Debido a cambios en diseño o enfoque de trabajo, que son por culpa del comprador, pueden requerirse cancelaciones de pedidos de equipo fabricado o materiales de diseño especiales. Las cancelaciones también pueden deberse a fallas del vendedor cuando éste no puede fabricar el equipo adecuadamente. En la orden de compra figuran, escritas, las cláusulas de cancelación, las cuales simplemente estipulan: "Este pedido puede ser cancelado, sin costo alguno para el comprador, dentro de 30 días después de haber sido colocado". Esta declaración se emplea cuando el comprador intenta limitar la acción del vendedor hasta que aquél esté listo a proceder con el trabajo. Cuando el trabajo ha sido iniciado por el vendedor y se decide cancelar el equipo por cambios en el enfoque del proyecto, el vendedor debe ser formalmente notificado para "interrumpir inmediatamente el trabajo y no incurrir en costos adicionales a cuenta del comprador". Luego se le pide al vendedor que remita todos los gastos de cancelación acompañados por los comprobantes de sus costos hasta el momento de la cancelación. El comprador puede aceptar la entrega de materiales comprados por el vendedor en relación con el pedido, o los materiales pueden ser retenidos en la bodega del vendedor para deducir el valor de los mismos de los gastos de cancelación.

Inclusive, si el equipo es cancelado debido a fallas del vendedor al fabricarlo inapropiadamente, los gastos de cancelación son cubiertos por el comprador. Es responsabilidad del comprador el tener cierto conocimiento de la capacidad del vendedor.

Nunca se debe proceder a una cancelación sin un completo conocimiento de los costos implicados. Estos incluyen los costos de mano de obra del vendedor, costos de materiales, pérdida de utili-

dades y pérdida de tiempo y horas-hombre de ingeniería del comprador.

COOPERACION ENTRE INGENIERIA DE PROYECTO Y PROCURACION

Las muchas obligaciones y responsabilidades del departamento de procuración sólo pueden cumplirse mediante la cooperación entre los grupos de procuración y de ingeniería de proyecto. Se necesita la mutua comprensión de las obligaciones y problemas de cada grupo, así como la vigilancia de su interdependencia.

Los ingenieros de proyecto deben recordar que los cambios en diseño producen retrasos en fabricación. Un cambio que en realidad puede ser bastante simple, se puede volver de lo más complejo cuando están implicadas organizaciones grandes. Planos, órdenes y subórdenes deben ser alterados antes de que el cambio real llegue al taller del fabricante. Por consiguiente, durante la etapa de fabricación sólo se deben hacer las alteraciones que sean absolutamente indispensables.

REFERENCIAS

1. Harriman, Norman F., *Principles of Scientific Purchasing*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1928.
2. Heinritz, Stuart F., *Purchasing*, Prentice-Hall, Inc., New York, 1947.
3. Johnson, E. R., G. C. Huebner, y G. L. Wilson, *Transportation Economic Principles and Practices*, D. Appleton-Century Co., New York, 1940.
4. Lewis, Howard T., *Procurement Principles and Cases*, Richard D. Irwin, Inc., Chicago, 1949.
5. *National Association of Purchasing Agents Handbook of Purchasing Policies and Procedures*, Volumes I and II, National Association of Purchasing Agents, New York, 1939 and 1942.
6. *Revised American Foreign Trade Definitions*, National Foreign Trade Council, 111 Broadway, New York, 1941.
7. Rindsfoss, C. E., *Purchasing*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1915.
8. Stufflebeam, G. T., *The Traffic Dictionary*, Simmons-Broadman Publishing Co., New York, 1950.

CAPITULO 10

PROCEDIMIENTOS DE OFICINA

La ingeniería es sólo una de las funciones del ingeniero de proyecto. Además de sus obligaciones técnicas, él debe manejar su oficina. El equipo humano de esta oficina por lo general está constituido por ingenieros de proyecto asistentes, una secretaria y un archivista. Este grupo constituye, por supuesto, solamente una pequeña parte de una oficina grande de ingeniería, la cual incluye otros ingenieros de proyecto o gerentes de proyecto y sus respectivos grupos, así como departamentos tales como de contabilidad, de compras, de dibujo y de especialidades de ingeniería.

Entre la oficina del ingeniero de proyecto y los otros departamentos hay un constante intercambio de ideas y de instrucciones, así como contactos directos y correspondencia con gente ajena a la compañía. Por consiguiente, él también debe desarrollar ciertas aptitudes para sostener conferencias y correspondencia y llevar su archivo. Vale la pena discutir cada una de estas funciones, puesto que la pobre ejecución de cualquiera de ellas producirá errores y diseños defectuosos, sin importar cuán competente sea la ingeniería.

CONFERENCIAS

En un día de actividades, el ingeniero de proyecto debe intercambiar ideas con mucha gente, no sólo por medio de conferencias formales sobre políticas a seguir, sino también mediante conferencias informales o juntas con personas de otros departamentos, representantes de clientes e ingenieros de ventas.

Como es siempre el caso al tratar con personas, cualidades intangibles, y en su mayor parte incapaces de ser enseñadas, tales como la modestia, el criterio liberal para las nuevas ideas y la cortesía, son importantes.

La modestia es uno de los rasgos personales más esenciales en cualquier campo de la ciencia. Cualquier científico verdadero está consciente de las muchas suposiciones y lagunas del conocimiento en su campo y nunca pretende saberlo todo. El ser modesto, no obstante, no significa ser zalamero. Las posiciones tentativas pueden ser sostenidas sin reticencia.

La liberalidad de criterio para las ideas nuevas es importante cuando se trata tanto con individuos como con grupos. Si dos ideas de igual mérito técnico son propuestas, una por el ingeniero de proyecto y la otra por una persona que ha de ejecutar la idea, será muy ventajoso usar la idea de la otra persona. Es lógico suponer que esta persona hará un mejor trabajo utilizando su propio método.

Asimismo, en conferencias grandes la mencionada liberalidad de criterio paga dividendos. En estas situaciones dicha liberalidad de criterio significa habilidad para escuchar a las otras personas. A menudo en conferencias se crea una atmósfera que parece impeler a cada asistente a participar en ella. Resistiendo a esta tentación y permaneciendo a la expectativa, se puede contribuir en forma inconmensurable, a medida que la conferencia avanza, a ofrecer conclusiones cuidadosamente consideradas y basadas en un análisis del problema y en las ideas expuestas por las otras personas.

A la mayoría de la gente se le han sembrado los beneficios de la educación y de la cortesía desde su infancia. Estas lecciones con frecuencia se olvidan cuando los visitantes autorizados llegan en momentos de mucha ocupación. Los ingenieros de ventas, en particular, reciben un tratamiento a veces impropio cuando su llegada es inoportuna. Estos profesionales, cuando son competentes, poseen considerables conocimientos acerca de sus campos particulares, y ayudan al ingeniero de proyecto a mantenerse informado sobre nuevos desarrollos. El tiempo gastado con ellos no es tiempo desperdiciado, aun cuando en el momento no se haga compra alguna de sus productos.

Juntas formales

En la industria moderna, la junta formal se ha convertido en una importante herramienta. En el proyecto de planta de proceso propicia, entre el personal clave y los especialistas, un compartimiento de ideas que si se efectuara por correspondencia tomaría semanas.

Para tener éxito, sin embargo, una junta formal debe tener un director capaz y un propósito definido, el cual debe conocerse varios días antes de la conferencia. Si se pretende lograr mucho, el propó-

sito de la junta debe ser específico. Las juntas sobre temas generales requieren demasiada gente, no logran nada y a menudo dan lugar a malas interpretaciones.

Cuando surge la necesidad de discutirse una fase específica del trabajo, únicamente debe requerirse la asistencia de gente que en forma verdadera va a contribuir en la discusión. El director o moderador de la junta debe entonces marcar el curso de la discusión y vigilar que se siga el plan original, aun a costa de la represión de los más fuertes argumentos de sus propias ideas.

Se deben hacer anotaciones de toda la junta. Sólo unas cuantas memorias son infalibles, y es recomendable tener actas de los acuerdos y decisiones, con objeto de que las responsabilidades estén claramente señaladas y las comisiones de trabajo queden por completo comprendidas. El salón de juntas debe estar bien iluminado, ser cómodo, tranquilo y amueblado con buen gusto. Un pizarrón siempre es de utilidad en discusiones de grupo y debe ser parte del equipo permanente del salón.

En los negocios modernos con frecuencia se abusa de la técnica de hacer juntas. Se convoca a demasiadas juntas innecesarias. Algunas organizaciones tienen tantas juntas, que queda poco tiempo para trabajar. Si una persona puede tomar una decisión, no tiene sentido ocupar el tiempo de otras personas. Las juntas deben ser convocadas únicamente cuando se debe tomar una decisión que requiera los conocimientos representados por muchas experiencias personales.

REDACCION TECNICA

Con frecuencia se critica al graduado en ingeniería por su falta de facilidad para expresar sus ideas. Generalmente, el pasante* de ingeniero toma uno o dos cursos sobre redacción de informes, experiencia que constituye su única guía en la forma de expresarse por escrito.

Dichos cursos son muy valiosos, pero en manera alguna la buena forma de expresarse puede nunca ser desarrollada solamente a través de cursos que enseñan las técnicas del arte. La buena forma de expresarse, más bien, es algo que deriva de juicios y experiencias que están fuera de los límites del campo específico del individuo.

Es lastimoso que el riguroso plan de estudios de una formal educación en ingeniería deje poco tiempo para la lectura y el estudio de otros campos. Muchos ingenieros en activo se dan cuenta de esta carencia y aplican parte de su tiempo libre para leer literatura no científica.

La redacción hecha por el ingeniero de proyecto debe estar adaptada para lectores muy diversos. Sus escritos incluyen:

---

* El autor usa la expresión *undergraduate engineer*. (N. del T.)

REPORTES TÉCNICOS. (*a*) Ofertas de contratos; (*b*) descripciones de plantas visitadas y de sus operaciones; (*c*) anotaciones detalladas sobre conferencias; (*d*) instrucciones técnicas tales como instrucciones de operación.

ARTÍCULOS TÉCNICOS (escritos para ser publicados en revistas comerciales o profesionales).

CORRESPONDENCIA. (*a*) Interoficinas; (*b*) instrucciones de diseño; (*c*) diversos tipos de cartas hacia fuera de su compañía.

Reportes técnicos

La preparación de un reporte técnico, como tal ha sido descrita en muchas formas[3,4,5,6] y, generalmente, es una parte del entrenamiento del ingeniero. Cada empresa tiene su propio método de composición. Por lo general la primera página es una carta a un superior, la cual a menudo se llama carta de remisión. Esta es proseguida por una página de títulos, un índice, un resumen y luego el cuerpo principal del reporte. La oferta del ingeniero contratista es un tipo de reporte.

La forma de reporte utilizada por una empresa dada debe ser seguida por sus empleados. No existe una forma perfecta. Por lo común la forma usada por una empresa se ha ido desarrollando de modo paralelo con la compañía, y se adapta particularmente a esa organización. La gerencia y demás personal se acostumbra a la forma, y debido a esta familiaridad se ahorra mucho tiempo.

Dentro de los límites de la forma el ingeniero es libre de ejercitar su ingenio y talento para redactar.

La consideración más importante en la redacción de reportes son los lectores. Al escribir un reporte, por ejemplo, para el presidente de una gran compañía química, un ingeniero debe darse cuenta de que la mayor parte del tiempo de ese ejecutivo se consume en la gerencia. El ya no practica más sus habilidades técnicas, y los embrollos técnicos ya no forman más parte de su modo de pensar. Si es necesario discutir teoría en el reporte, deben proporcionarse los antecedentes y, de ser posible, debe ser descrita en términos que el lego pueda entender.

Artículos técnicos

Las revistas técnicas periódicas son centros de distribución para nuevas teorías e ideas. En estas revistas los técnicos deben leer artículos o resúmenes de artículos con objeto de familiarizarse con los últimos adelantos y, de ser posible, remitiendo trabajos para su publicación, deben contribuir al conocimiento general con nuevas ideas y datos experimentales.

La calidad de tal contribución se refleja tanto en el autor como en su empresa, y se debe tener sumo cuidado en su preparación. Su-

poniendo que la información presentada en el artículo sea confiable, el siguiente aspecto en importancia es el modo de presentación.

La redacción técnica debe estar libre de frases largas y tediosas y debe estar escrita lo más claramente posible. Puesto que el tema muchas veces es difícil de comprender, lo menos que el autor puede hacer son frases individuales fáciles de entender.

Correspondencia

La correspondencia constituye la mayor parte de la redacción de un ingeniero de proyecto. Si la correspondencia es excesiva, el ingeniero de proyecto se convierte en un "barajador de papeles".

Casi todas las grandes empresas de negocios se enfrentan con un tremendo volumen de papel. Aunque en estos tiempos modernos las comunicaciones han sido grandemente simplificadas, la palabra escrita es aún el único método legalmente aceptable de indicar responsabilidades. En muchas organizaciones la práctica en gran escala de que una de las partes registre las razones que tuvo para actuar conforme a la instrucciones de la otra, se debe a falta de confianza individual, de iniciativa y, por lo general, de seguridad en sí misma. La frase "póngalo por escrito" es una orden común en la industria. A partir de esta idea se genera mucha de la correspondencia inútil.

La correspondencia exterior es necesaria, pero puede ser reducida mediante una planeación cuidadosa. La correspondencia interior, o interoficinas, se usa para emitir instrucciones o responsabilidades definidas. Sin embargo, cuando bastan las instrucciones verbales, insistir en los memorandos escritos es perder el tiempo. Por supuesto, para decidir cuándo unas instrucciones verbales son adecuadas, se debe aplicar el criterio. Ciertamente, las instrucciones complejas que implican datos numéricos deben ser escritas, aunque, en la práctica, una simple orden o solicitud rara vez necesita ser por escrito.

Otra fuente principal de correspondencia inútil en los negocios puede ser atribuida a una restricción excesiva de autoridad. Sin autoridad o sin instrucciones precisas, el individuo debe buscar, en cada paso, "cubrirse a sí mismo" mediante la comprobación escrita de sus acciones.

Todas las firmas de negocios pueden tener ventajas económicas a través de un análisis objetivo de sus procedimientos de correspondencia. Mucha correspondencia interoficinas puede ser del todo eliminada, y aquella que es necesaria puede ser limitada a un original y una copia para el archivo de trabajo. Las formas que pueden ser llenadas a mano o mediante unos cuantos renglones mecanográficos, ahorran a la vez tiempo y dinero. Estas formas se discuten más adelante.

Correspondencia interoficinas

La carta, nota o memorando interoficinas generalmente se identifican por un encabezado impreso en algún tipo de forma. La correspondencia interoficinas o interdivisiones en las organizaciones de servicio de ingeniería, con frecuencia también se identifica fácilmente mediante el uso de papelería de color. A continuación se muestran algunas formas típicas.

EJEMPLO DE CARTA DE INTEROFICINAS

(1) **Fecha**: Enero 2, 1955
(2) **A**: R.D. Plow (2)
(3) **De**: S.S. Shear
(4) **Copias**: E.D., M.N., R.J.
(5) **Asunto**: Revisiones al Plano 2246-02-E1

(6) **Cía. Química XYZ**
Interoficinas
(7) **Asignación de fondos**
No 2246
(8) **Archivo** 4.15.6

(9) El Plano 2246-02-E1 va a ser revisado de acuerdo con las anotaciones del ejemplar que se adjunta. Cuando la revisión esté terminada y verificada, antes de su distribución general, favor de regresar dos (2) ejemplares al suscrito.

(10) S.S. Shear, Ing. de Proyecto

(11) Anexo: 1
(12) SSS/ef

Los números entre paréntesis se utilizan aquí para fines de discusión, pero no aparecen en la carta real. Una peculiaridad de la carta interoficinas es la omisión de las formas de salutación, tales como *Muy señor mío*, o *Estimado señor*, y de las de cierre del texto, tales como *Suyo, afectuosamente*. Existe, sin embargo, material de identificación en los renglones 5, 6, 7 y 8.

El ejemplo es una carta de remisión, común en las empresas grandes. Cita varios archivos y también, en este caso, hace referencia a un plano. Todos los renglones numerados, excepto los marcados con los números 9, 10, 11 y 12, están impresos en la carta. El renglón 6 identifica a la empresa y es necesario, en atención a que copias de tales cartas algunas veces se adjuntan a correspondencia formal exterior. Las iniciales de los destinatarios de las copias (Renglón 4), con frecuencia se usan en la correspondencia interoficinas. El archivo (Renglón 8) se refiere a los expedientes particulares del departamento o proyecto y sirven para que los empleados de oficina archiven la comunicación. En las segundas hojas (cuando la carta contiene más de una página) se omiten todos los

encabezados impresos, excepto el 6. La fecha se agrega mecanográficamente, así como el número del proyecto. Las hojas de copia son similares a las segundas hojas, mostrando únicamente el renglón 6.

Formas de memorando

Para las comunicaciones interoficinas algunas veces se usan las formas de memorando. Estas, por lo general, son de la mitad (21.5 × 14.0 cm) del tamaño carta. El nombre de la empresa aparece en estas formas, y en el encabezado generalmente se incluyen los renglones 1 y 2, y 6 y 7. Dichos memorandos pueden ser notas manuscritas.

Cartas de instrucciones generales

Comúnmente las cartas con instrucciones generales al personal se emiten en algún tipo de forma reproducible, a manera de poder efectuar su distribución a diversas personas. Algunas veces se utiliza la siguiente forma.

EJEMPLO DE UNA INSTRUCCION GENERAL

Cía. Química XYZ
Depto. de Ingeniería
Carta Núm. 2832

Fecha: Enero 2, 1955

Asunto: Uso de máquinas de tipos variables (*)

A: Dibujante en Jefe, todos los Ingenieros de Proyecto, Jefes de Sección de Diseño, Jefes de Departamento de la División de Ingeniería, Depto. de Mantenimiento de Planta.

Cuatro (4) máquinas de tipos variables han sido instaladas en el salón 308 (extremo norte del tercer piso del Edificio de Ingeniería), y han estado en uso por varias semanas durante el entrenamiento del operador. Estamos anexando copias de una hoja que ilustra los diversos tamaños de forma de tipos, números y símbolos que están disponibles. Para copias adicionales, se puede llamar a la Ext. 325.

Las máquinas han sido adquiridas para reducir la cantidad de letreros hechos a mano en los planos y, por medio del tipo más pequeño, para reducir el tamaño de las copias. Es de esperarse que el personal de supervisión se familiarice con la aplicación de estas máquinas, a efecto de que puedan ser empleadas al máximo posible.

---

* Comúnmente conocidas como máquinas para dibujar letras, números y símbolos. (N. del T.)

Las instrucciones generales están siendo preparadas y en breve se darán a conocer.

A.D.Hochstad, Ingeniero en Jefe

Esta comunicación general incluye un número de correspondencia que simplifica su archivo, así como su identificación cuando las revisiones sean necesarias. Es frecuente que dichas comunicaciones se emitan en formas especiales a modo de poderlas identificar con facilidad. En el caso de una empresa grande, el uso de papelería de distinto color es, probablemente, el método más sencillo de identificación.

Comunicaciones de remisión (interoficinas)

En una empresa se debe transferir una cantidad grande de datos. Las comunicaciones o formas de remisión ahorran tiempo de mecanografía. La siguiente forma únicamente requiere llenar o marcar las frases aplicables.

EJEMPLO DE COMUNICACION DE REMISION

Fecha:

A:

De: Proyecto Núm. ____________

Estamos anexando ______ copias de: ____________

Plano Núm. ____________

B/M (+) Núm. ____________

Plano del vendedor ____________ Vendedor ____________

Aprobado ____________ Favor de revisar conforme se anota ____________

Remítase para fabricación ____________ Remítase para construcción ____________

Para su uso en diseño ____________ Para su uso y archivo ____________

Para uso preliminar, únicamente ______

Cuando se revise, favor de regresar ______ copias al suscrito.

* B/M significa *Bill of Materials*, Relación de Materiales. (N. del T.)

Comunicación de instrucción de diseño

En adición a la comunicación de instrucciones generales, se recomienda habilitar una forma especial para las modificaciones de ingeniería y diseño. Para esta correspondencia, las firmas contratistas de ingeniería usan diferentes nombres, tales como "Instrucción de diseño", "Memorando de ingeniería" o, algunas veces, "Comunicación de diseño". El requerimiento más importante para tales memorandos es una diferencia visible con los otros tipos de correspondencia, a modo de que puedan recibir un manejo especial. La siguiente es una comunicación típica de diseño.

EJEMPLO DE UNA INSTRUCCION DE DISEÑO

(1) CORPORACION DE INGENIERIA ABC, PRINCIPIA, N. J.

(2) Cliente CIA. QUIMICA XYZ
(3) Fecha 11/21/42 (4) Contrato 6-25316-2 (5) Inst. de diseño, Núm. E-22
(6) SEC. DE DISEÑO E (7) Hoja 1 de 1
(8) Plano (9) Vendedor x (10) Material B/M
(11) Especificación x

En junta celebrada el 11/21/57 se acordó que todos los motores eléctricos sean manufacturados por Gyre Electric Co. Los números aplicables de catálogos son :

H.P.	Voltaje	Cat. No.
Hasta 5 hp	220/110	E-A-1222
De 6 a 30 hp	440	E-B-2136
De 31 a 50 hp	440	E-C-3145
De 51 y más	2300	D-4460

A.L. Gerund, Ing. de Proyecto

(12)

G	F	B	S	P	V	H	M	E	I	Proc.	EF	CF	C	Total
								1		1	1	1	2	6

Los renglones 1, 2 y 3 se explican por sí mismos. El renglón 4 muestra el número de contrato, asignado por el contratista, "Corp. de Ingeniería ABC". Este tipo de designación numérica está encontrando amplio uso en industrias en donde se usan sistemas automáticos de contabilidad. En este caso, el primer número se refiere al tipo de trabajo general, tal como diseño y erección de una planta

química. El primer dígito del segundo número se refiere al tipo de contrato; los cuatro siguientes dígitos representan el número consecutivo de contrato. El último número indica la parte del proyecto.

El renglón 5 se refiere al asunto y al número de la instrucción. En este caso el asunto es *E* (diseño eléctrico); el 6 muestra la sección o grupo básico de diseño al cual las instrucciones se dirigen de manera primordial; el 7 es un método de numeración de hojas ideado para evitar el traspapeleo de las mismas.

Los renglones 8, 9, 10 y 11 proporcionan un medio de designar el tipo de información general. En este caso, el 9, vendedor, y el 11, especificación, están marcados porque la información se refiere a un vendedor y es una especificación. Si un plano o relación de materiales estuvieran implicados, los renglones 8 o 10 estarían marcados.

El renglón 12 se refiere a un método simplificado para indicar la distribución y número de copias de la Instrucción de diseño. Las letras se refieren a las secciones o departamentos de diseño, como sigue:

G	General	B	Edificios
F	Cimentaciones	P	Tubería
S	Estructural, acero o concreto	H	Aparatos térmicos
V	Recipientes	E	Equipo eléctrico
M	Equipo mecánico	Proc.	Procuración
I	Instrumentación	CF	Archivo del contrato
EF	Archivo de ingeniería		
C	Cliente		

En el ejemplo presente, las copias marcadas son para E, Equipo eléctrico; Proc., Procuración; EF, Archivo de ingeniería; CF, Archivo de contrato; y C, Cliente.

Correspondencia comercial

Los tipos de cartas escritas a empresas exteriores pueden ser (*a*) correspondencia entre un propietario y un contratista; (*b*) entre comprador y vendedor; (*c*) diversas instrucciones de ingeniería o procuración a los subcontratistas, vendedores y firmas consultoras.

CORRESPONDENCIA PROPIETARIO-CONTRATISTA

Las empresas de operación por lo general restringen la correspondencia externa a la de sus ejecutivos o personal clave. La correspondencia entre propietario y contratista, originada por parte del propietario, por lo común será firmada por un ejecutivo o, a nombre de éste, por la persona que origina la carta (véase ejemplo).

Por el contrario, las firmas contratistas no pueden restringir la elaboración de correspondencia puesto que muchas funciones pueden ocurrir simultáneamente y cualquiera restricción resultaría im-

práctica. No obstante, el gerente de proyecto debe enterarse de las copias de toda la correspondencia conforme ésta pasa hacia el archivo general del contrato.

Toda correspondencia entre el propietario y el contratista, de ordinario será dirigida al ingeniero de proyecto del contratista, con independencia del asunto tratado.

EJEMPLO DE UNA CARTA DE PROPIETARIO A CONTRATISTA

Cía. Química XYZ
Dinwiddie, Florida

E. G. Martin, Ingeniero en Jefe Carta Número 168
Febrero 2,1956

Corporación de Ingeniería ABC
1223, 8th. St.
Principia, N.J.

At'n.Sr. A.L. Gerund

Asunto: Asignación de fondos Núm. 8-2324, Contrato ABC 6-25316-2
Instrucción de diseño E-22

Muy señores nuestros:

Con objeto de efectuar un posible ahorro en los costos de transmisión, se ha decidido que la especificación para motores de más de 5 H.P. incluya las palabras "o igual" después del número de catálogo de la Cía. Eléctrica Gyro.

Para otros fabricantes aceptables de motores, favor de referirse a nuestra Lista Aprobada de Vendedores remitida en nuestra carta Núm. 55, de noviembre 16, 1955. Se sugiere que, en adición a las ofertas de Gyro, sólo se soliciten dos (2) cotizaciones más.

Atentamente
Cía. Química XYZ
E.G. Martin, Ingeniero en Jefe

Por ______________________
S.S. Shear, Ingeniero de Proyecto

SSS/ef
Copias para: E.D., M.N., R.J.
Asignación 8-2324

EJEMPLO DE UNA CARTA DE CONTRATISTA A PROPIETARIO

Corporación de Ingeniería ABC
1223 Eighth St.
Principia, N. J.

(1) Contrato 6-25316-2
(2) Carta Núm. 85
(3) Archivos 5,7,15
Febrero 6, 1956

(4) Sr. E.G. Martin, Ingeniero en Jefe
Cía. Química XYZ
Dinwiddie, Fla.

(5) At'n. Sr. S.S. Shear, Ingeniero de Proyecto
(6) Asunto: Carta 168 e Instrucción de Diseño E-22. Conversación telefónica del 2/2/1956

Muy señores nuestros:

La presente confirma nuestra conversación telefónica en la cual les avisamos que su carta Núm. 168 (Febrero 2, 1956) no afectaría la especificación original de un fabricante, Cía. Eléctrica Gyro, para transmisiones de motor.

Siguiendo nuestra práctica usual, el departamento de procuración obtuvo tres ofertas para motores basadas en datos preliminares. Esto resultó innecesario, puesto que sus especificaciones originales habían indicado únicamente un solo fabricante. Las propuestas recibidas fueron analizadas, como es nuestra costumbre, con todos los equipos. Se encontró que Gyro tiene una entrega aceptable, y los precios fueron más bajos, en todas las partidas, que con otros cotizadores. En este caso el análisis no les fue remitido, porque la oferta más baja fue recibida del fabricante que ustedes habían especificado originalmente.

En enero 2, 1956, se emitió al vendedor una carta de promesa de compra con objeto de colocar el equipo en un programa próximo. Nuestra orden de compra confirmatoria, basada en especificaciones finales, ha sido ahora remitida a la Cía. Eléctrica Gyro. De no cambiar nuestra prioridad, la entrega puede ser esperada a principios de junio.

Atentamente
Corporación de Ingeniería ABC

____

A.L. Gerund, Ingeniero de Proyecto

ALG/rs

La correspondencia entre propietario y contratista por lo general se numera como se muestra en el renglón 2. La carta se dirige al ingeniero en jefe, a la atención del ingeniero de proyecto, renglones 4 y 5. El asunto, renglón 6, se describe en detalle. Cuando el número de contrato no se pone en alguna otra parte, debe ser incluido en el asunto.

CARTAS A VENDEDORES, CARTAS DE PROMESA DE COMPRA

Las cartas a los vendedores se refieren a cambios en diseño y materiales, costos adicionales, fechas de entrega y declaraciones de promesa de compra.

De ordinario los vendedores son notificados de la colocación de un pedido mediante la recepción de una orden de compra. La preparación y distribución de una orden de compra consume bastante tiempo, y cuando se puede retrasar la entrega, se hace una carta de promesa de compra, como en el ejemplo siguiente, a efecto de poner el equipo bajo pedido antes de la expedición de una orden formal de compra.

EJEMPLO DE UNA CARTA DE PROMESA DE COMPRA

Corporación de Ingeniería ABC
1223 Eighth St.
Principia, N. J.

(1) Contrato 6-25316-2
(2) Archivos 7,15
Enero 2,1943

Compañía Eléctrica Gyro
2286 Enoch Ave.
Portland, 6, Pa.

Asunto: Oferta 3427, octubre 23, 1942

Muy señores nuestros:

Sírvanse aceptar esta comunicación como una carta de nuestra promesa de compra del equipo que básicamente se describe en su oferta 3427, siempre y cuando:

a. Los precios cotizados sean firmes.
b. Se mantenga su promesa de entrega de seis (6) meses o menos con base en nuestra escala de prioridad.
c. Ustedes estén de acuerdo en proceder inmediatamente con la ingeniería, el diseño y la fabricación, colocando este equipo en su programación.

Les suplicamos acusar recibo de esta carta inmediatamente. Nuestra orden formal de compra les será remitida en Fecha próxima junto con todas las especificaciones.

Atentamente,
CORPORACION DE INGENIERIA ABC

N.A. MAYBERRY, Jr.,

Agente de compras

NAM/pe

EJEMPLO DE CARTA SOBRE DATOS DE DISEÑO A UN VENDEDOR

Corporación de Ingeniería ABC
1223 Eighth St.
Principia, N. J.

Contrato 6-25316-2
Archivos 7,15
Febrero 16,1956

Cía. Robertson Tubing
897 Field St.
Portland 6, Pa.

Asunto: Nuestra O.C. 5316-87

Su carta de febrero 12,1956

Muy señores nuestros:

Las sustituciones de material de acero inoxidable, solicitadas en su carta de febrero 12, han sido turnadas a nuestro departamento de ingeniería, y la aprobación ha sido concedida. El tipo 309 es aceptable en donde se ha especificado el tipo 316.

Nuestra especificación original será revisada y remitida; sin embargo, con base en esta carta sírvanse proceder inmediatamente.

Atentamente
CORPORACION DE INGENIERIA ABC.

N.A. Mayberry, Jr.,

Agente de Compras

*RL/NAM/me

---

* Esta carta fue preparada por alguna otra persona, pero remitida bajo la firma del agente de comras.

Cartas externas de remisión

En el caso de empresas ajenas, algunas veces se usa una forma de carta de remisión.

EJEMPLO DE UNA CARTA EXTERNA DE REMISION

Corporación de Ingeniería ABC
1223 Eighth St.
Principia, N. J.

Fecha:

A:

Contrato Núm. ____________________

Carta Núm. ____________________

Archivo ____________________

Muy señores nuestros:

Estamos anexando______copias del Plano Núm ____B/M Núm.______ preliminarmente terminado de revisar.

Para aprobación____________________

Para su uso y registro____________________

Sírvanse regresar_________copias, a la brevedad posible, con su aprobación o comentarios.

Atentamente,
Corporación de Ingeniería ABC

____

Al recibir los anexos, sírvanse regresar una copia de esta remisión para nuestro archivo.

Telegramas, cable, teletipo

Para comunicaciones escritas importantes que requieren acción inmediata, se emplean el telegrama (localmente), el cable (hacia el extranjero) y el teletipo. Los telegramas son transmitidos por líneas de la Western Union y los mensajes de teletipo por líneas de compañías telefónicas.

Tanto la Western Union (telegramas) como el sistema telefónico local (teletipo) instalan teleimpresoras o máquinas para enviar o recibir mensajes en cualquier oficina.

TELEGRAMAS

Por la instalación o el uso del teleimpresor de la Western Union no se hace cargo alguno, pero una empresa debe ser bien conocida o debe tener ciertos antecedentes que indiquen el uso de este sistema. A menos que haya escasez de máquinas en una área particular, el tener un teleimpresor instalado no implica grandes dificultades.

El tablero de la máquina es casi idéntico al de una máquina estándar de escribir. El operador marca la oficina local, y cuando es reconocido, su mensaje es mecanografiado sobre una hoja continua. El papel es de 8½ plg (21.6 cm) de anchura, similar a la papelería estándar. El mensaje puede ser reproducido con varias copias. La oficina local recibe el mensaje y lo transmite a una oficina local en la ciudad de destino. Si el destinatario tiene un teleimpresor, el mensaje es reproducido en su máquina. En caso contrario, el mensaje generalmente es telefoneado y confirmado más tarde mediante una copia enviada por correo. Cuando el destinatario está en una área metropolitana, el mensaje puede ser entregado por un mensajero.

El cargo por mensajes telegráficos se basa en el número de palabras y en el tipo de mensaje. El servicio de hilo directo, que es más caro, transmite inmediatamente, con independencia de la hora del día. Otros tipos de servicio son la carta diurna, que es entregada inmediatamente en horas hábiles, y la carta nocturna, que se transmite por la noche y se entrega a la mañana siguiente.

EJEMPLO DE UN TELEGRAMA DE NEGOCIOS

```
CORPORACION DE INGENIERIA ABC. WUX
PRINCIPIA,N.J.
   (1)     (2)
2324-832  RELET OCHO TRES ENVIESE MAS INFORMACION SOBRE PRECIO Y
ENTREGA.PREFIERASE ESPECIFICACION ORIGINAL DOS CERO SEIS GUION UNO.
SIGUE CARTA.

                                       (3)  QUIMICA XYZ  MARTIN
```

La abreviación WUX después del nombre de la compañía indica que la compañía tiene un teleimpresor. El concepto (1), que algunas veces se usa, es un sistema de numeración con fines de contabilidad de costos. La cifra 2324 es el número de asignación de fondos, tal como se usa en el departamento de contabilidad para cargar costos en contra de dicha asignación. El segundo número, 832, es

el número consecutivo de telegrama y no tiene relación alguna con costos, pero puede ser utilizado para archivo y referencia.

El concepto 2, "Relet", es una condensación de palabras que significa "referencia a carta".*. Para referirse a un telegrama se usa "Retel". Para hacer referencia a mensajes telefónicos, algunas veces se usa "Rephone". La oficina telegráfica local proporcionará datos de costos y abreviaturas y condensaciones aceptables. Después del telegrama, los números son deletreados, ya que los números transmitidos pueden ser cambiados o mezclados al enviarse, y el deletreo de las cifras elimina la posibilidad de tal error.

Los cables son similares a los telegramas, pero en la redacción de aquéllos se debe poner mayor cuidado debido al costo más alto por palabra. Sin embargo, con independencia del costo, el mensaje de un telegrama o de un cable debe ser claro. El ahorrar el costo de una palabra, a expensas de la claridad, puede significar el envío de otro cable o telegrama.

TELETIPO

El teleimpresor de teletipo es similar al teleimpresor Western Union, excepto que el procedimiento es diferente. El operador marca la oficina local de teletipo, dando la clave de la parte distante deseada. Antes que un mensaje pueda ser transmitido, el operador debe esperar hasta que se logra una conexión con la oficina distante. Los mensajes de teletipo únicamente pueden ser transmitidos a otra máquina. Estas máquinas operan de manera muy similar a las comunicaciones telefónicas. No hay transmisión o transferencia de mensajes. Los golpes mecanográficos sobre la máquina del remitente mecanografían simultáneamente el mensaje en su propia máquina y en la del destinatario. Dado que la transmisión es instantánea, se puede entablar una conversación mecanografiada.

El costo de los mensajes se carga sobre una base de tiempo, similar a las tarifas de las llamadas telefónicas de larga distancia. Con independencia del servicio, por las máquinas de teletipo se hace un cargo nominal mensual.

La forma de teletipo puede variar para adaptarse a las necesidades del usuario. El número de palabras afecta al precio únicamente en la medida que afecta al tiempo de la máquina para enviar el mensaje. En atención a que un mensaje sólo puede ser transmitido después de hacer conexión con el receptor del destinatario, la dirección y salutación pueden ser simplificadas. Si una empresa tiene diferentes sucursales, el teletipo es de extrema utilidad para transmitir simultáneamente idénticos mensajes a todos los receptores conectados.

---

* *Reference to letter*, en el original. En español, la condensación podría ser *Recar*. (N. del T.)

SERVICIOS TELEGRÁFICOS ARRENDADOS

Tanto el sistema de teletipo como el de telegramas ofrecen un servicio continuo instantáneo por medio de líneas arrendadas entre puntos. Si se obtiene una línea en arrendamiento, la máquina transmisora opera instantáneamente las máquinas conectadas. El costo es alto, puesto que implica el soportar de continuo el alquiler de una línea. Empero, cuando el número de mensajes diarios a una oficina dada es muy grande, la línea arrendada puede resultar económica.

TELÉFONO DE LARGA DISTANCIA VERSUS TELETIPO Y TELEGRAMA

La comunicación mecanografiada suministrada por teletipo y telegrama es, en muchos casos, más satisfactoria en el campo de los negocios que la comunicación telefónica. De una conversación telefónica no se obtiene registro alguno, a menos que se haga intervenir una tercera parte o una máquina.

Hay veces que, a pesar de ser más cara, es preferible una llamada telefónica de larga distancia. El teléfono es superior cuando se necesita establecer un contacto personal o verbal. El escuchar la voz de una persona, con frecuencia da un mejor conocimiento de una situación particular. Desafortunadamente algunos empleados abusan de este privilegio y celebran reuniones y conversaciones personales con empleados distantes antes de entrar en materia sobre el motivo de la llamada.

Estilo de correspondencia escrita

La correspondencia funciona como un sustituto de la conversación y debe ser tan natural como el carácter del asunto lo permita. Deben evitarse las frases pomposas y trilladas, y las cartas deben ser cortas e "ir al grano".

La mayoría de la gente elabora cartas que son ligeras y fácilmente entendibles cuando dicta dichas cartas a una secretaria, o mejor, a un dictáfono. Después de que un ingeniero practica el arte de dictar, su carta dictada se oye mucho menos estereotipada y más conversacional que una carta que él mismo escribe en papel.

El uso de un dictáfono tiene muchas ventajas. Las ideas pueden ser registradas conforme se ocurren y la secretaria no necesita ser interrumpida. Sin embargo, la transcripción de material dictado requiere una secretaria más competente que la secretaria promedio: una secretaria que sepa deletrear, puntuar y distribuir correctamente su mecanografía.

Ayuda secretarial

Una secretaria competente es una necesidad para la operación fluida de la oficina de un ingeniero de proyecto. Se requiere una

persona inteligente, de preferencia con alguna experiencia en ciencias o campos conexos, así como con un buen conocimiento del empleo de formas o palabras en el idioma inglés.*

La calidad de la correspondencia dependerá en gran parte de la habilidad de la secretaria para transcribir con nitidez y precisión el material dictado. Esto debe ser hecho con la mínima interrupción hacia otros miembros del grupo de trabajo. Una secretaria con iniciativa resulta sumamente valiosa para señalar errores. En adición a todas estas cualidades, la secretaria debe ser de aspecto pulcro y agradable, ya que ella debe también servir como recepcionista del ingeniero de proyecto y su grupo.

SISTEMAS DE ARCHIVO

Para cualquier tipo de negocio, el sistema de archivo puede llegar a ser un problema en extremo enfadoso, a menos que se lleve de una manera lógica y consistente. El propósito fundamental de mantener un archivo es disponer de un registro de documentos, la importancia del cual depende, por supuesto, del tipo de negocio.

Archivo general

Cualquier organización de ingeniería debe mantener cierto tipo de archivo general en donde se puedan registrar la política y otros asuntos generales aplicables a todas las operaciones. El siguiente es un sistema típico de archivo, utilizado para un archivo general de proyecto de planta de proceso. Las designaciones numéricas se usan para indicar las claves de archivo en todas las comunicaciones, de modo que no se necesite requerir de archivistas para dicidir la sección apropiada de archivo.

1.00 Ingeniería, políticas de los departamentos.
- 1.01 Ingeniería de proceso.
- 1.02 Ingeniería mecánica.
- 1.03 General.

2.00 Datos de diseño.
- 2.01 Equipo mecánico.
- 2.02 Equipo eléctrico.
- 2.03 Instrumentación.
- 2.04 Recipientes.
- 2.05 Tubería.
- 2.06 Acero estructural.
- 2.07 Cimentaciones.
- 2.08 Arquitectónico.

---

* Recuérdese que el idioma de los autores de esta obra es el inglés. Es claro que el buen conocimiento que arriba se cita debe ser necesario en el idioma particular de que se trate. (N. del T.)

3.00 Especificaciones.
3.01 Equipo mecánico.
3.02 Equipo eléctrico.
3.03 Otros.

Esta clasificación puede extenderse todo lo que se desee. Secciones adicionales podrían ser, 4.00 Lista de materiales; 5.00 Operaciones de construcción; 6.00 Procuración; 7.00 Pólizas del contrato. La ventaja del sistema decimal es evidente. Por vía de ejemplo, el renglón 2.04 podría ser subdividido como sigue:

2.04 Recipientes.
2.0401 Cámaras forjadas
2.0402 Recipientes de placa.
2.0403 Recipientes de lámina delgada.
2.0404 Tolvas.
2.0405 Tanques de almacenamiento elevado, de agua; etc.

o, el renglón 2.01, Equipo mecánico, podría ser ampliado a:

2.0101 Bombas, recíprocas.
2.0102 Bombas, centrífugas.
2.0103 Bombas, rotatorias.
2.0104 Bombas, de desplazamiento positivo.
2.0105 Turbinas, etc.

La única información que debe ser colocada en el Archivo General es la que puede ser de utilidad para establecer las políticas generales. A guisa de ilustración, supóngase que un cierto tipo de especificación en material de tubo o lámina está siendo descontinuado por el fabricante. Debe ser del inmediato interés de todas las personas implicadas que esa especificación particular se ha vuelto obsoleta. En tal caso, a todos los jefes de los departamentos interesados se les hace llegar una circular general, archivándose en la sección 2.04 una copia de esta información. El archivo efectivo de datos en alguna sola localización, tal como el archivo general, permite a cualquier persona interesada en la historia de las diversas políticas encontrar la información requerida sin molestar a ningún departamento particular. De lo que se infiere que un archivo general tiene ciertas características de biblioteca.

Archivo del proyecto

Cualquier firma dedicada a servicios a base de contrato, debe implantar un solo tipo de sistema de archivo para ser utilizado en todos los proyectos. Estos sistemas tienen la decidida ventaja de ser familiares a todo el personal, y de que el entrenamiento del personal de oficina en el archivo se convierte en una tarea sencilla. Si cada persona estableciera su propio sistema de archivo, habría tantos sistemas como personas, y cada uno de ellos sería completamen-

te extraño para todas las personas con excepción de las directamente implicadas.

El siguiente sistema de archivo del proyecto es sencillo y fácil de aprender.

1.0 Contrato.
   1.01 Estimaciones.
   1.02 Extras del contrato.
2.0 Instrucciones de diseño (Pueden estar en carpetas de hojas sueltas)
   2.01, 2.02, 2.03 (Se clasifica en la misma forma que para el Archivo General).
3.0 Correspondencia del y para el Cliente (Excepto 1.0 y 6.0).
4.0 Correspondencia del y para el Departamento de Construcción.
5.0 Reportes de avance y comisiones.
   5.1 Ingeniería, 5.2 Procuración, 5.3 Construcción.
6.0 Correspondencia de contabilidad.
7.0 Procuración.
   7.1 Embarque, tráfico, expeditación, 7.201 (Se clasifica en la misma forma que para 2.00 del Archivo General).
8.0 Notas de juntas.
9.0 Archivo por día (copias de toda la correspondencia enviada, archivadas de acuerdo con la fecha).

El último renglón, 9.0, es importante, ya que constituye un medio positivo de localizar una carta cuando sólo se conoce la fecha aproximada en que fue escrita.

RELACIONES HUMANAS Y ESTADO DE ANIMO DEL PERSONAL

Las funciones de oficina que han sido discutidas y la mayoría de las fases técnicas de las obligaciones del ingeniero de proyecto implican contacto con otras personas. Un elevado estado de ánimo del personal y unas relaciones humanas experimentadas hacen que en una oficina los muchos contactos personales sean agradables y provechosos.

Pocas personas pueden ignorar el hecho de que en la vida casi todas las funciones están basadas en las relaciones con los demás. Un ingeniero puede ser extraordinariamente capaz en su campo y, a pesar de ello, no tener éxito alguno o ser de utilidad limitada debido a su incapacidad para trabajar con otras personas. Indudablemente, en el problema de las relaciones humanas existen tantos enfoques como personalidades, y no hay una sola solución para todas las situaciones, ya que no existen dos personas o grupos de

gente que reaccionen en la misma forma. No obstante, es cierto que pocas personas son insensibles a la personalidad constantemente agradable o a las consideraciones por parte de otra persona.

El estado de ánimo de la empresa se afecta por muchos factores. Entre ellos se encuentran los salarios no equitativos, las condiciones pobres de trabajo, el personal ejecutivo incompetente o la falta de incentivos para progresar. Los problemas de salario siempre son difíciles para el ingeniero, quien algunas veces siente que los ajustes no son éticos.

Aunque a menudo las condiciones de trabajo no son tan importantes para el ingeniero como para otros tipos de personal, cualquier medio ambiente que es agradable al individuo debe mejorar su actitud personal y, por ende, su productividad.

La queja habitual del ingeniero joven es la sensación de estar siendo "enterrado" en una empresa grande. El líder de grupo que consistentemente se aprovecha de todos los detalles o fallas para distribuir la responsabilidad, sólo está creando un problema de estado de ánimo inconveniente, problema que con frecuencia se traduce en alto porcentaje de reposición de mano de obra. Muchas veces el interés del personal más joven puede ser sostenido mediante una responsabilidad adicional. En las empresas de ingeniería, los "cuellos de botella" a menudo pueden ser achacados directamente a un solo individuo, quien no comprende la ventaja que, tanto para él como para la empresa, representa una distribución máxima del trabajo.

La admirable facultad del ingeniero para dejarse absorber en un problema particular, con frecuencia produce malas interpretaciones. De esta manera, los ingenieros a veces se ganan la desafortunada reputación de ser olvidadizos de todo menos de su trabajo. Ellos se acostumbran a reducir todas las cosas a alguna base real o lógica. Sin embargo, las relaciones humanas rara vez se pueden referir a hechos lógicos o precisos. A menos que el ingeniero haga un esfuerzo hacia la comprensión de los requerimientos de compatibilidad, él se puede encontrar a sí mismo aislado por su personalidad, independientemente de su capacidad técnica.

REFERENCIAS

1. Crouch, W. G., y R. L. Zetter, *A Guide to Technical Writing*, 2a. Ed., Ronald Press Co., New York, 1954.
2. Howell, A. C., *Handbook of English in Engineering Usage*, 2a. Ed., John Wiley & Sons, New York, 1940.
3. Kerekes, F., y R. Winfrey, *Report Preparation*, Iowa State College Press, 2a. Ed., Ames, Iowa, 1951.
4. Kobe, K. A., *Chemical Enginnering Reports*, 3a. Ed., Hemphills Book Store, Austin, Texas, 1950.
5. Mills, G. y J. Walter, *Technical Writing*, Rinehart Bros., New York, 1954.
6. Weil, B. H., *The Technical Report*, Reinhold, New York, 1954.

CAPITULO 11

CONTRATOS Y CONTRATISTAS

En términos sencillos, un contrato es un acuerdo entre dos o más partes, por el cual se obligan a sí mismas a cumplir con determinadas cosas. La forma de contrato utilizada varía con las diferentes empresas y con el tipo de objetivo del servicio requerido. Los contratos pueden referirse únicamente a servicios de ingeniería o a toda la ingeniería y construcción, incluyendo la compra y la erección de materiales. Un contrato puede ser un simple instrumento, tal como una orden de compra, o puede ser un documento largo y extenso. En todos los casos los documentos se vuelven efectivos al ser formalmente firmados por los representantes de cada empresa.

El propósito de un contrato es proteger a ambas partes y asegurar que ciertas obligaciones serán realizadas en la manera prescrita. Es un error común por parte de los legos el suponer que los contratos de construcción son primordialmente para proteger al propietario contra el contratista. Los contratos pueden ser redactados a manera de favorecer a cualquiera de las partes. Sin embargo, un acuerdo de cualquier clase consiste en obligar a todas las partes a cumplir con dicho acuerdo.

FIRMAS DE INGENIERIA Y CONSTRUCION (CONTRATISTAS)

La industria de la construcción es una parte de lo más importante y necesaria de la economía nacional, y rinde un servicio único a

la industria en general manteniendo grupos de especialistas altamente desarrollados en todos los campos de la ingeniería.

Cuando han requerido servicios nuevos, la mayoría de las firmas de proceso han encontrado ventajoso contratar los servicios de una empresa de ingeniería y construcción. Una organización contratista experimentada siempre puede hacer mejor y en forma más expedita un trabajo de ingeniería y construcción, que las fuerzas de ingeniería y construcción de la compañía de operación, las cuales deben ser precipitadamente expandidas para un proyecto de una planta nueva.

Alguna gente sostiene de manera errónea la creencia de que las firmas contratistas a menudo son poco escrupulosas. No obstante, las firmas importantes de ingeniería y construcción operan en forma muy parecida a la de cualquier otra organización grande de negocios. Las continuas fallas, la negligencia, las malas relaciones con los clientes o, en general, un rendimiento pobre conducirían rápidamente a la ruina al negocio de cualquier contratista, puesto que su reputación es su capital más importante.

La mayoría de las críticas que se hacen a los contratistas van dirigidas hacia sus costos por servicios. Ninguna organización comercial puede operar sin ganancias. La consideración de los honorarios del contratista con respecto al valor de la producción de una planta erigida, mostrará que en lugar de ser exorbitantes, en realidad más bien son modestos. Un gran porcentaje de las plantas de proceso están diseñadas a modo de pagar su costo total en tres a cinco años, incluyendo los reemplazamientos normales de mantenimiento. Empero, pocas plantas se construyen que no continúen operando con modificaciones pequeñas por diez a veinte años. Parecería más equitativo considerar los honorarios del contratista con respecto a la vida de la planta, más que como una sola suma devengada en 18 o 24 meses. Cuando se distribuye en los muchos años de operación normal, dicha suma ciertamente parece pequeña.

SELECCION DEL CONTRATISTA

Cuando están implicados los fondos públicos o gubernamentales, en cada estado existen diversos estatutos que rigen los métodos de establecer contratos. Por lo general, estos métodos no se siguen en la industria privada, aunque de hecho todas las firmas siguen la práctica de recibir ofertas o propuestas en la forma de estimaciones por trabajo o por servicios. La selección de un contratista debe estar basada en un análisis de los precios propuestos obtenidos a través de las solicitudes de cotizaciones y en la reputación o experiencia del contratista en ciertos tipos de trabajo.

La preparación de los datos que han de usarse en la obtención de ofertas de contratistas, generalmente es una tarea costosa para

la empresa contratante, en vista de que dicha información se convertirá en la base para la oferta del contratista y, por consiguiente, debe ser lo más completa posible con objeto de evitar malas interpretaciones. El mejor medio de lograrlo estriba en que tales datos sean preparados por ingenieros de diseño experimentados. Al contratista se le debe proporcionar información suficiente para diseñar, en la manera preferida por el propietario, el tipo de planta deseada.

Muchas firmas de proceso tienen extensas especificaciones mecánicas y de proceso, las cuales han sido compiladas para proporcionar una cierta uniformidad en la compra y el diseño de ingeniería del equipo comúnmente utilizado. En tales casos, una copia de dichas especificaciones debe ser facilitada al contratista que está preparando una propuesta, a modo de que él las pueda incorporar en su diseño y estimación preliminares. Además, también se deben proporcionar descripciones completas de las obligaciones del propietario y del contratista, el sitio propuesto para la planta, las facilidades de transporte, los servicios, las materias primas disponibles y los procesos que se han de utilizar.

El grado de información de proceso requerida variará con el proyecto. En algunos casos el contratista actuará como consultor y proporcionará un diseño completo de proceso. Con frecuencia, no obstante, la firma de proceso ha desarrollado su propio proceso. En este caso la firma de proceso debe suministrar al contratista un diseño completo de proceso o proveerle suficientes datos de proceso, de modo que el contratista pueda hacer un diseño preliminar.

Los contratistas deben preparar un diseño preliminar con objeto de hacer una estimación del costo para emplearla en sus propuestas. Esta propuesta debe contener la siguiente información:

a. Descripción general del proyecto.
b. Alcance del trabajo del contratista.
c. Descripción de cada parte de la planta con diagramas de flujo y planos del terreno.
d. Servicios estimados.
e. Equipo auxiliar que ha de construirse (almacenes, talleres, etc.).
f. Lista y descripción breve del equipo principal (bombas, recipientes, intercambiadores de calor).
g. Especificaciones mecánicas que han de seguirse.
h. Establecimiento de la calidad del producto y de la capacidad de producción.
i. Costos y honorarios propuestos.

Los anteriores son algunos de los renglones principales. Se debe incluir toda la información necesaria para describir el diseño propuesto y el compromiso del contratista. Las ilustraciones, gráficas y diagramas esquemáticos de flujo, claros y sin complicaciones, son

en extremo valiosos. Los ejecutivos que deben examinar las ofertas son personas ocupadas y aprecian grandemente estas ayudas para una rápida comprensión.

Los contratos nunca deben ser adjudicados solamente sobre la base del precio. Para una instalación dada, las cotizaciones de los más grandes constructores de plantas de proceso difieren entre sí en tan sólo unos cuantos puntos porcentuales. El propietario debe tener sumo cuidado en aceptar una oferta baja de una firma desconocida. Aunque el contratista pueda ser sincero en su oferta, la inexperiencia puede causar errores que más tarde pueden originar una situación insostenible.

Los propietarios sin experiencia algunas veces cometen el error de suponer que cualquier contratista está capacitado para construir cualquier planta con sólo haber tenido experiencia en construcción. Algunas veces los contratistas son también culpables del mismo criterio. Antes de seleccionar un contratista desconocido, el propietario debe estar convencido de la capacidad del candidato. Debe obtener del contratista los nombres y la experiencia del personal que será asignado al contrato, e investigar por inspección visual, instalaciones similares construidas por el contratista. Las discusiones con otros propietarios también resultan ventajosas. En un proyecto importante, el propietario debe hacer toda clase de esfuerzos para determinar las limitaciones del contratista, sus antecedentes financieros, las condiciones de su equipo y sus relaciones generales, de negocios y laborales. El estado financiero también debe ser considerado en la selección de contratistas para proyectos importantes, en atención a que, generalmente, el contratista debe hacer fuertes erogaciones antes de obtener su primer reembolso.

A pesar de que los contratos puedan ser relativamente sencillos o en extremo largos, es de dudarse que la longitud o términos restrictivos de un contrato tengan mucho efecto sobre el tipo general de trabajo realizado por el contratista. El mejor seguro para el propietario se finca en la capacidad y la integridad del contratista, comprobadas por medio de experiencias anteriores. Probablemente pueda demostrarse que la mayoría de los problemas entre propietarios y contratistas son el resultado de la ineptitud de personal del propietario o del contratista, lo cual conduce a malas interpretaciones de difícil solución y, más tarde, a consecuencias más serias. La organización de contratistas, como cualquier otro grupo, está sujeta a las debilidades comunes y a los errores humanos. No obstante, las firmas confiables, dado que ponen su reputación en juego, siempre hacen todos los esfuerzos razonablemente posibles para satisfacer a sus clientes. Por otra parte, a menos que el contratista sea completamente incapaz, el diseño básico y la construcción estarán siempre dentro de los límites de los diversos códigos nacionales aplicables en la práctica.

LAS BASES DE UN CONTRATO

Los contratos pueden referirse al desarrollo, ingeniería, procuración y construcción de una planta de proceso, o únicamente a una de estas fases. Los contratos pueden ser entre un propietario y un contratista, o entre un primer contratista, que actúa como agente para un propietario y muchos subcontratistas. Las bases para los acuerdos contractuales son prácticamente ilimitadas. Las siguientes descripciones de diversos servicios son las que, por lo general, se utilizan para el diseño y la erección de plantas de proceso. Se supone que todas ellas son entre una firma de operación o *propietario* y una firma de ingeniería o *contratista.*

1. Contratista como consultor; el contratista efectúa solamente servicios de consultoría o supervisión, realizando otras firmas la ingeniería, la procuración y la construcción.
2. El propietario efectúa toda la ingeniería y la procuración, realizando el contratista los servicios de erección únicamente; esto puede ser variado para que la erección sea efectuada por varios contratistas.
3. El propietario efectúa todo el diseño de proceso y proporciona los datos al contratista; éste lleva a cabo toda la ingeniería detallada, la procuración y la erección.
4. El contratista efectúa investigación básica y desarrollo, ingeniería, procuración, erección y operación inicial: este tipo de contrato a veces se denomina contrato "completo".

TIPOS DE REEMBOLSOS (Clasificación de contratos)

La clasificación de contratos de acuerdo con el modo de reembolso es el método más conocido y el más importante desde un punto de vista legal y de negocios. De hecho, los contratos por lo general se denominan de acuerdo con la política de reembolso. A continuación se da una breve descripción de las más importantes de estas formas de contratos. La referencia a algunos trabajos detallados sobre este particular[2,3,4,5] resultará valiosa para quienes quieran mayor información, pero es obvia la necesidad de consejo legal en todas estas materias.

Contrato a porcentaje

El término a porcentaje, sencillamente significa que al contratista se le van a reembolsar todos los costos aplicables al contrato, más un porcentaje de los mismos para sus gastos generales y utilidades. De costumbre, este porcentaje varía con cada tipo de trabajo y de servicio. Los costos reembolsados por servicios de ingeniería pueden ser tan altos como 215 a 220%, o más, del costo de la mano

de obra de ingeniería. Otros costos, tales como viajes, comunicaciones, reproducciones, mano de obra de oficina, por lo general son del orden del 105 a 115% del costo real. El porcentaje más alto de mano de obra de ingeniería está basado en la venta de tecnología del contratista y en el costo de personal clave del contratista.

Los costos de construcción incluyen salarios especializados y comunes a razón de 110 a 125%, cargos de supervisión de la construcción sobre una base similar que para la ingeniería, y costos de herramientas pesadas para la construcción basados en tarifas fijas de alquiler de las máquinas. Para herramientas pequeñas y otros equipos de consumo, generalmente se carga el costo real más un pequeño porcentaje.

Si el contratista procura todos los materiales y equipos de la planta, suele cargarlos a un porcentaje comprendido entre el 105 y el 115% del precio real de compra para cubrir los costos de compra. Si el propietario paga todos los costos de personal en la procuración, el porcentaje basado sobre el costo de los materiales o del equipo puede ser mucho más bajo.

La crítica habitual que se hace al contrato a porcentaje consiste en que, dado que las utilidades del contratista aumentan directamente con sus costos, el propietario no tiene control sobre los costos, y el contratista, por consiguiente, los incrementa lo más posible. Esta idea es errónea. Bajo el contrato a porcentaje, los auditores e ingenieros del propietario tienen un continuo acceso a todos los registros del contratista. Por otra parte, el propietario tiene autoridad sobre todo el personal del contratista y las actividades relacionadas con el contrato. De hecho, el contratista actúa casi como una división de la compañía del cliente.

Por estas razones, a menos que el personal del propietario carezca por completo de experiencia, hay pocas posibilidades para excesos extraordinarios de costos. Por lo general el propietario también ejerce un pleno control de todas las partidas gastadas o desembolsos efectuados; así que, en cierto modo, el propietario es más responsable de los costos que el contratista. Si el propietario tiene experiencia en operaciones de ingeniería y construcción, son remotas las posibilidades de costos excesivos derivados del sistema a porcentaje.

Muchas de las más grandes firmas de proceso prefieren el contrato a porcentaje con respecto a otros tipos de contrato, ya que eso les da mucha más libertad y control sobre el contratista. Cuando el diseño de proceso está incompleto o se han de hacer muchos cambios en el diseño original, el propietario tiene muchas ventajas con el contrato a porcentaje. En realidad, el contrato a porcentaje, si se ejecuta apropiadamente y si se establece con un contratista confiable, puede ser tan efectivo y tan económico como el contrato a precio alzado o por un máximo garantizado u otros tipos de contratos a precio fijo.

Sin embargo, los contratistas experimentados generalmente prefieren un arreglo a precio fijo, puesto que esta forma de contrato, una vez que las especificaciones han sido aceptadas, permite mayores libertades al contratista. En el caso de una operación a porcentaje, se necesita una contabilidad de costos mucho más estricta, y el personal del contratista está, en algunos aspectos, únicamente al servicio del propietario. El contrato a porcentaje, no obstante, es generalmente el único método satisfactorio de operación cuando el trabajo no puede ser específicamente señalado con anticipación, o cuando existen muchos problemas de construcción, difíciles o imposibles de estimar al comienzo de la obra.

Contratos a porcentaje con honorarios fijos

El contrato a porcentaje con honorarios fijos es similar a la forma normal de contrato a porcentaje, con excepción de que el contratista puede únicamente ganar unos honorarios especificados. Todos los otros pagos son desembolsos para costos directos, solamente. Hay muchas posibles variaciones de los dos tipos de contrato a porcentaje.

Contratos a precio alzado o a precio fijo

El contrato a precio alzado no permite la menor variación por encima o por debajo de una suma fija. El contratista se compromete a realizar ciertos servicios que son especificados en detalle por el propietario en una solicitud de presupuesto, o por el contratista en una oferta. Si después de que el contrato entra en vigor, el propietario hace cualesquier cambios, se puede hacer o no un ajuste dependiendo de los términos del contrato. Empero, si los costos se incrementan, el contratista generalmente puede demandar un pago extra. Estos contratos a menudo causan malas relaciones entre las partes debido a interpretaciones opuestas de las especificaciones o planos originales.

El contrato a precio fijo para la planta de proceso requiere la preparación de una estimación detallada. Los datos preliminares pueden ser proporcionados por el propietario o por el contratista. Algunas veces los propietarios solicitan a los contratistas que, para la propuesta, acumulen sus propios datos, o que empleen a otras firmas en la preparación de datos para dichos fines.

La propuesta del contratista, o la solicitud de cotización del propietario para lo obra a precio alzado o a precio fijo, debe ser mucho más detallada que para otros tipos de contratos que tienen provisiones para contingencias.

Como otras formas de contrato, el contrato a precio alzado está sujeto a críticas. Dado que el contratista está limitado a un precio fijo, todos los posibles ahorros aumentan su utilidad. De esta suerte,

el contratista puede ser acusado de efectuar ahorros a expensas de la calidad. Sin embargo, las especificaciones para las diversas partes de la planta de proceso generalmente son muy completas, y son pocas las posibilidades de hacer grandes cambios con respecto a la propuesta original.

Contratos de máximo garantizado

El contrato de máximo garantizado es similar al contrato a precio alzado, excepto que el precio garantizado puede ser aplicado únicamente al material (y equipo), o únicamente a la mano de obra. En este contrato puede permitirse una escala de aumentos,* ya sea en el material o bien en la mano de obra, o el contrato puede excluir todo tipo de escala de aumentos.

Los contratos de máximo garantizado con frecuencia se redactan a manera de otorgar al contratista una bonificación cuyo monto depende de la cantidad de costos que estén por debajo del máximo. El propietario participa en un grado considerable con el contrato de máximo garantizado, en atención a que necesita estar de continuo al pendiente de todos los costos.

Los tipos de contrato que se han discutido son representativos de los tipos de contratos más comunes empleados para proyectos de plantas de proceso. También se utilizan muchos otros tipos que incorporan ciertas características de varios de los tipos más comunes de contratos.

LA FORMA DEL CONTRATO

El tipo más convencional de contrato consta de dos partes. La primera de ellas se llama el convenio. Incluye una descripción del objetivo general del trabajo, generalmente por medio de referencias a una propuesta o especificaciones y planos; se cita también el precio del contrato y términos de pago, y contiene las firmas formales necesarias, atestiguadas y notariadas. Algunas veces las firmas pueden estar en la última página del documento. La segunda parte consiste en las condiciones generales. Se discuten renglones tales como fecha de terminación, cancelación, subcontratos, seguros y muchos otros términos. También puede adicionarse una tercera parte para incluir documentos legales, certificaciones y descripciones especiales de ciertos renglones incluidos en la segunda parte.

En lugar de intentar una discusión detallada de las características de un contrato, más se puede aprender estudiando realmente

---

* La escala de aumentos es una cláusula en un contrato por medio de la cual se permite un cambio en el precio unitario del material, del equipo o de la mano de obra después de un lapso fijo especificado. Por ejemplo, un contrato que se firma en enero, puede permitir, después de esa fecha, aumentos en los costos hasta un cierto porcentaje del precio original cotizado.

un contrato típico. En seguida se presentan dos contratos típicos de los que se utilizan para proyectos a porcentaje de plantas de proceso.

Al contrario de lo que habitualmente se cree, los contratos de ingeniería no son difíciles de entender. Deben estar necesariamente redactados de manera que las malas interpretaciones no sean posibles. Muchos años de experiencia legal y de decisiones de la Corte han producido ciertas frases estándares que han resultado ser inmunes a las interpretaciones incorrectas y que, por consiguiente, constituyen una sólida protección para ambas partes.

Contrato típico a porcentaje para servicios de ingeniería únicamente

I. CONVENIO

Este convenio entra en vigor a partir del día _____ de ________________, y se celebra por y entre la Compañía XYZ, autorizada para operar en ____________________, la cual en lo sucesivo se designará como CONTRATISTA, y la Corporación Química PDQ, sita en Delaware y con sus oficinas principales en Chicago, Illinois, la cual en lo sucesivo se designará como CLIENTE.

SE ATESTIGUA: que por y entre las partes que aquí se citan se conviene en lo siguiente:

Artículo 1. Alcance del Trabajo

El CONTRATISTA realizará toda la ingeniería y diseño necesarios en la forma como sean requeridos en la preparación de todos los planos; la lista de todos los materiales; la preparación de todas las especificaciones; de acuerdo con la propuesta del CONTRATISTA, adjunta como Anexo I.

Artículo 2. Tiempo para completar el trabajo

El CONTRATISTA conviene en proceder inmediatamente con el trabajo y en ejecutarlo y realizarlo con diligencia y con la mayor prontitud posible. Salvo que lo impidan circunstancias fuera de su control en los términos que se describen más adelante, Artículo 10*b* de la Parte II, Condiciones Generales, el CONTRATISTA se propone completar el trabajo dentro de los doce (12) meses siguientes a su iniciación.

Artículo 3. Compensación del CONTRATISTA

El CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA todos los costos directos en los términos que se indican más adelante bajo Costos Directos, Artículos 1, 2, 3 y 4 de la Parte II, Condiciones Generales.

II. CONDICIONES GENERALES

Artículo 1. Costos directos, Mano de obra y Servicios de laboratorio

a. Pagas y salarios de todo el personal ocupado en el trabajo, incluyendo, pero no limitado, a ingenieros, diseñadores, cajeros, dibujantes, localizadores, preparadores de listas de materiales, operadores de máquinas vari-type, mecanógrafos de requisiciones, operadores de máquinas de reproducciones, taquígrafos y otros del personal del CONTRATISTA que se ocupen en trabajos de este contrato específico.

b. Pagas y salarios de Técnicos de laboratorio del CONTRATISTA y costos directos, aprobados por el CLIENTE para uso del equipo de laboratorio y/o servicios de laboratorio del CONTRATISTA.

Artículo 2. Costos directos, Materiales

a. Materiales utilizados en operaciones de reproducción.
b. Costos de arrendamiento de equipo especial.

Artículo 3. Costos directos, Varios

a. Costos de comunicación incluyendo teléfono, teletipo, telégrafo, cable y portes postales.

b. Gastos de viaje y de estancia de personal del CONTRATISTA, cuando el viaje sea solicitado y autorizado por el CLIENTE.

c. Costos por diversos seguros contraídos por el CONTRATISTA solamente como resultado de este contrato.

d. Costos de servicios de consultoría cuando sean autorizados por el CLIENTE; como costos de mano de obra y de materiales o de arrendamiento de equipo.

Artículo 4. Costos directos, Sobreporcentajes

Los costos relacionados al CLIENTE por el CONTRATISTA en lo que se refiere a pagas y salarios, serán incrementados en porcentajes fijos de acuerdo con el programa de costos contenido en el Anexo II, excepto por lo que respecta a horas extras, según se discute en el Artículo 10*e*, Parte II. Todos los otros costos serán incrementados en un porcentaje de acuerdo con el Programa de Costos contenido en el Anexo III.

Artículo 5. Procedimiento de facturación del CONTRATISTA

a. Todas las facturas remitidas al CLIENTE por el CONTRATISTA deben ser comprobadas por referencia a nóminas específicas en el caso de costos de mano de obra, y por referencia a facturas del vendedor en el caso de materiales.

b. El CLIENTE debe recibir duplicados de los certificados de seguro, para reembolsar al CONTRATISTA las primas de dichos seguros.

c. Las cuentas de gastos para los empleados deben ser comprobadas por medio de recibos de hotel, talones de boletos de viaje u otros recibos de transporte, como prueba del gasto.

d. En el quinto día de cada mes, o antes de dicho día, el CONTRATISTA proporcionará al CLIENTE una estimación (por cuadruplicado) de los gastos totales de mano de obra y materiales (relacionados por separado) para los dos meses siguientes. Uno de estos meses será el mes en el cual se presenta la estimación. La estimación incluirá las horas-hombre en ingeniería, dibujo y oficina con el costo total desglosado y referido a horas-hombre.

e. En el quinto día de cada mes, o antes de dicho día, el CONTRATISTA facturará al CLIENTE todos los costos contraídos en el mes anterior. Las facturas deben ser remitidas por cuadruplicado y en forma separada para cada categoría de costo: mano de obra, materiales, comunicaciones, gastos de viaje y seguros. Todos estos costos deben ser computados de acuerdo con el Programa de Costos contenido en los Anexos II y III.

Artículo 6. Pagos del CLIENTE

a. Cuando se encuentren de acuerdo con los términos de este convenio, el CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA, en o antes del quinto día del mes siguiente a aquel en que las facturas son remitidas por el CONTRATISTA, todos los costos relacionados.

b. El CLIENTE, si así lo desea, puede retener al CONTRATISTA, hasta la terminación del trabajo contratado y la plena aceptación por el CLIENTE del trabajo del CONTRATISTA, el pago del 5% de los costos de mano de obra re-

lacionados. Si el CLIENTE elige pagar al CONTRATISTA dentro del intervalo antes citado, el total de lo facturado, el CLIENTE obtendrá una reducción en los costos de mano de obra relacionados, de un medio (½) de uno por ciento (1%) en los cargos de mano de obra. Todos los fondos retenidos por el CLIENTE se harán efectivos treinta (30) días después de la recepción de la relación regular final del CONTRATISTA y de la aceptación del trabajo por el CLIENTE.

Artículo 7. Procedimiento de Contabilidad de costos y Mano de obra del CONTRATISTA

El CONTRATISTA debe llevar registros diarios del tiempo empleado por su personal contratado por horas y registros semanales del tiempo empleado por su personal contratado por semana. El CONTRATISTA debe llevar registros por separado de todos los costos aplicables al contrato, incluyendo las nóminas, las facturas de materiales, las cuentas de gastos, los registros de las comunicaciones y cualesquier otros registros que puedan requerirse para aprobación de costos. Tales registros deben llevarse de acuerdo con los métodos aceptables por los auditores del CLIENTE, y estarán a la disposición del CLIENTE para ser auditados cuando se requieran. No se reembolsarán al CONTRATISTA los costos originados por la preparación o mantenimiento de tales registros.

Artículo 8. Estimaciones del CONTRATISTA

Se entiende que las estimaciones preparadas por el CONTRATISTA para el CLIENTE son el mejor análisis del CONTRATISTA sobre el trabajo que ha de hacer o completar durante los dos (2) meses consecutivos siguientes, tomando como base su calendario normal del trabajo. El CONTRATISTA no manifiesta que tales estimaciones han de considerarse como exactas con respecto a las cantidades relacionadas al CLIENTE.

Artículo 9. Personal del CONTRATISTA

a. Con la aceptación y de acuerdo con el CLIENTE el CONTRATISTA asignará al trabajo uno o varios ingenieros de proyecto. El personal así asignado no será separado del trabajo ni asignado a otras obligaciones por el CONTRATISTA sin la aprobación del CLIENTE.

b. El CONTRATISTA proporcionará al CLIENTE una lista de todo el personal clave que ha de utilizarse en el trabajo del CLIENTE. La lista deberá incluir la experiencia de cada persona nombrada.

c. El CLIENTE puede, en cualquier momento, bajo petición escrita al CONTRATISTA, separar del trabajo del CLIENTE a cualquier personal asignado por el CONTRATISTA.

d. El CLIENTE se reserva el derecho de controlar en un nivel inferior al del personal clave de diseño la asignación de personal del CONTRATISTA con respecto al número de personas empleadas en cualquier momento en el trabajo del CLIENTE. El CONTRATISTA reducirá su personal conforme le sea solicitado, dentro del término de un día hábil después de la recepción del aviso del CLIENTE en las oficinas del CONTRATISTA con referencia a personal empleado. Las pagas o salarios de personal del CONTRATISTA asignado al CLIENTE fuera de las oficinas del CONTRATISTA, serán por CUENTA del cliente hasta el momento de regreso a las oficinas del CONTRATISTA.

Artículo 10. Gastos de viaje del personal del CONTRATISTA

El CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA los gastos del personal que tiene que vivir fuera de su casa, o que viajar, o efectuar cualquier otro tipo de gasto a petición del CLIENTE, hasta las cantidades descritas en el Programa de Cosos, Anexo III. El tiempo de viaje para dicho personal del CONTRA-

TISTA contará desde el momento de salida de la ciudad de las oficinas del CONTRATISTA hasta el momento de regreso al punto de salida.

Artículo 11. Días festivos, Periodos de vacaciones—Personal del CONTRATISTA

a. El CONTRATISTA absorberá todos los costos relacionados con días festivos pagados o periodos de vacaciones normalmente concedidos al personal del CONTRATISTA empleado en el trabajo del CLIENTE, cuando tales periodos caigan dentro de la vigencia de este contrato.

b. El CLIENTE puede solicitar del CONTRATISTA que determinado personal trabaje en los fines de semana o en los días festivos. Cuando se convenga de mutuo acuerdo con el CONTRATISTA, el CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA dichos costos con apego a la política de personal del CONTRATISTA, y tales remuneraciones se manejarán de acuerdo con salarios de tiempos extras o primas especiales.

c. El CLIENTE puede solicitar del CONTRATISTA la posposición del periodo de vacaciones de determinado personal; sin embargo, el CLIENTE no se hará responsable de los salarios por los periodos de vacaciones al personal del CONTRATISTA, en el caso de que las vacaciones de un empleado se pospongan, a menos y excepto que se llegue a un mutuo acuerdo para empleados específicos entre CONTRATISTA y CLIENTE.

Artículo 12. Empleo de personal nuevo, Pagos de separación y de cese del personal del CONTRATISTA

a. Todo el personal del CONTRATISTA debe considerarse al servicio del CONTRATISTA, y el CLIENTE no acepta responsabilidades sobre los pagos a dicho personal, de acuerdo con la política del CONTRATISTA, en el caso de que el personal sea cesado por el CONTRATISTA.

b. Cuando el CONTRATISTA emplea personal de acuerdo a sus estimaciones del trabajo requerido, el CLIENTE no asume responsabilidad por la duración de dicho trabajo, ni en manera alguna acepta obligación de ninguna especie con el CONTRATISTA o con el personal en lo referente a la extensión del trabajo o del empleo.

c. El CONTRATISTA tendrá completa libertad por lo que respecta al empleo de personal de acuerdo con su política anterior, con excepción de que el CLIENTE no aceptará aumentos en las tarifas de mano de obra del personal sobre las tarifas promedio que para diversas categorías de personal se muestran en el programa de costos, Anexo II.

d. Si existe un mutuo acuerdo entre CLIENTE y CONTRATISTA, los cambios en las tarifas del personal clave del CONTRATISTA pueden ser aceptados por el CLIENTE; no obstante, el CLIENTE se reserva el derecho de rechazar cualquiera y todas las reclasificaciones, cambios de tarifas, o cualesquier cambios en la estructura de las tarifas, que tendieran a incrementar los costos.

Artículo 13. Terminación del trabajo. Tiempo extra

a. El CONTRATISTA hará todo su esfuerzo para completar el trabajo lo más pronto posible. El CLIENTE no hará responsable al CONTRATISTA por el trabajo que se atrase debido a la falta de datos que deban ser suministrados por o a través de los esfuerzos del CLIENTE. El CONTRATISTA acepta toda la responsabilidad por la acumulación de datos o por la expeditación de datos de los fabricantes de equipo anotados en la propuesta bajo el Anexo I, equipo que haya sido desarrollado y/o diseñado por el CONTRATISTA.

b. En caso de que causas fuera del control del CONTRATISTA, como huelgas, incendios o cualesquier otros sucesos que no resulten de los actos del CONTRATISTA afecten su trabajo a modo de retrasar seriamente su ter-

minación, este convenio puede ser cancelado por mutuo consentimiento de ambas partes.

c. El CONTRATISTA puede hacer trabajar tiempo extra a determinado personal si ambas partes están de mutuo acuerdo en que dicho trabajo es necesario. El CONTRATISTA no será reembolsado por las horas-hombre en exceso ni por el pago de tiempo extra al personal en los casos en que no haya sido obtenido el consentimiento previo del CLIENTE; sin embargo, el CONTRATISTA puede, si así lo desea, hacer trabajar tiempo extra a su personal hasta un máximo de 10% de las horas normales de trabajo, en cuyo caso tales horas en exceso y los costos correspondientes serán cargados a su propia cuenta.

d. El CONTRATISTA conviene en hacer trabajar tiempo extra a su personal, a petición del CLIENTE, hasta un máximo de 20% en exceso de las horas normales por semana, por empleado. El CONTRATISTA será reembolsado por el CLIENTE en todos los costos resultantes del trabajo en tiempo extra.

e. Los sobreporcentajes que se anotan en el Programa de Costos, Anexo II, para pagas y salarios, no serán aplicados a los pagos de primas al personal del CONTRATISTA por horas extras de trabajo.

Artículo 14. Cancelación de contrato

a. El CLIENTE puede cancelar este convenio en cualquier momento siempre y cuando lo notifique por escrito al CONTRATISTA con diez (10) días hábiles de anticipación.

b. En el caso de cancelación, el CLIENTE dará al CONTRATISTA un lapso razonable para preparar registros o cualesquiera de los datos que han de pasar a poder del CLIENTE. El lapso requerido para preparar dichos registros o datos en ningún caso será mayor de treinta (30) días a partir de la fecha de aviso de cancelación.

c. El CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA las pagas y salarios que de mutuo acuerdo se hayan establecido al personal que pueda estar ocupado en cualquier trabajo después del aviso de cancelación a que se refiere el periodo de terminación de treinta (30) días antes citado.

d. El CONTRATISTA también será reembolsado por otros costos razonables, tales como pueden ser esperados para materiales o mano de obra en relación con la transferencia de datos al CLIENTE.

e. Los sobreporcentajes mostrados en el Programa de Costos, Anexo II, para pagas y salarios, no serán aplicados a costos de mano de obra por horas-hombre gastadas después de que el CONTRATISTA da o recibe aviso de cancelación.

f. El CONTRATISTA puede cancelar el contrato, (1) dando aviso escrito al CLIENTE de tal cancelación con treinta (30) días de anticipación, y (2) sólo en el caso de que el CLIENTE falte al cumplimiento de su parte de este convenio. Dicha falta puede ser considerada como efectiva si el CLIENTE se rehúsa a reembolsar con prontitud al CONTRATISTA, o no lo reembolsa dentro del plazo convenido después de recibir las facturas del CONTRATISTA.

g. En el caso de cancelación por el CONTRATISTA, se aplicarán todas las formas descritas en este Artículo 14 referentes a cancelación por el CLIENTE, excepto que el aviso de cancelación debe ser dado al CLIENTE por el CONTRATISTA con treinta (30) días de anticipación.

Artículo 15. Planos, Hojas de cálculo y Datos del CONTRATISTA

a. Todos los planos, croquis, dibujos, reproducciones de cualquier plano o dibujo utilizados en el trabajo son propiedad del CLIENTE y le deben ser retornados en cualquier momento que él lo solicite por escrito.

b. Todos lo cálculos, copias de cálculos, apuntes de dibujos, u otros datos utilizados en el trabajo y preparados por el CLIENTE para uso del CONTRA-

TISTA, o preparados por el CONTRATISTA, son propiedad del CLIENTE y le deben ser retornados en cualquier momento que él lo solicite por escrito.

c. Todas las listas de materiales, comprobantes de compras de materiales, u otros datos relativos son propiedad del CLIENTE y le deben ser retornados en cualquier momento que él lo solicite por escrito.

d. La cancelación del contrato por el CLIENTE o por el CONTRATISTA constituirá una petición para la devolución de todos los datos cubiertos en los párrafos *a*, *b* y *c* anteriores de este Artículo 15 de la Parte II de este Convenio, y el CONTRATISTA procederá en forma inmediata en todo lo correspondiente, excepto en lo que a continuación se especifica, bajo *e*.

e. En el caso de que el CLIENTE no reembolse al CONTRATISTA dentro de los sesenta (60) días subsiguientes a la presentación y recibo de las facturas del CONTRATISTA, éste puede retener todos los datos, planos y otras partes pertinentes del trabajo descritas en este Artículo 15 hasta que el CLIENTE cumpla sus obligaciones o entre ambas partes se llegue a un mutuo acuerdo.

Artículo 16. Seguros

El CONTRATISTA proporcionará cobertura mediante seguro de acuerdo con instrucciones del CLIENTE: (*a*) por todos los registros o datos, o cualquiera de las propiedades del CLIENTE localizadas en los predios del CONTRATISTA o que obren en su poder; (*b*) por cualquier vehículo automotriz empleado en el trabajo del CLIENTE; (*c*) por cualquier empleado del CONTRATISTA que viaje a petición del CLIENTE. El CLIENTE conviene en reembolsar al CONRATISTA todas las primas de tales seguros.

Artículo 17. Patentes, Regalías

a. El CONTRATISTA conviene en mantener al CLIENTE libre de todos o cualesquier costos derivados de violaciones de patentes en cualquier diseño utilizado por el CONTRATISTA, excepto por diseño de proceso iniciado por el CLIENTE o diseño de acuerdo con instrucciones explícitas del CLIENTE.

b. El CONTRATISTA someterá inmediatamente a la atención del CLIENTE los diseños que éste solicite y que en opinión del CONTRATISA constituyan violación.

c. El CLIENTE negociará y será responsable del pago de todas las regalías, honorarios, tasas de impuestos u otros costos que deriven del uso de procesos licenciados, o de métodos o materiales cuyo uso requiera licencia.

Artículo 18. Experiencia del CONTRATISTA, Diseño de Ingeniería

a. El CONTRATISTA manifiesta ser un diseñador experimentado del equipo y procesos por los cuales él acepta la responsabilidad en el Anexo I de la Propuesta.

b. El CONTRATISTA acepta la total responsabilidad por todos los métodos básicos de diseño mecánico, estructural y eléctrico empleados en trabajo de ingeniería por él realizado.

c. El CONTRATISTA acepta la total responsabilidad por los diseños de proceso incluidos en el Anexo I.

Artículo 19. Garantía, Responsabilidad del CONTRATISTA

a. El CONTRATISTA garantiza todo el equipo básicamente diseñado por él, contra fallas por diseño defectuoso, por un periodo que no exceda de un (1) año a partir de la fecha de su primer uso en operación, cuando dicho equipo se erige y emplea en el servicio para el cual fue diseñado y destinado en for-

ma mecánica o de proceso. En el caso de que el equipo no sea puesto en operación, el tiempo de garantía del CONTRATISTA se limita a dieciocho (18) meses a partir de la fecha de terminación del trabajo o de recepción del equipo en el punto de erección, lo que primero ocurra.

b. La garantía del CONTRATISTA se limita a equipo diseñado por él mismo. El equipo diseñado o construido por terceros está limitado por la garantía del diseñador y/o constructor, excepto que el CONTRATISTA preparará especificaciones para dicho equipo con el fin de obtener, en todos los aspectos, la mejor garantía posible en beneficio del CLIENTE.

c. La responsabilidad del CONTRATISTA en el caso de falla de los equipos mecánicos por él diseñados, estará limitada a la sustitución o reparación de cualquiera de tales equipos, sin costo alguno para el CLIENTE.

d. La responsabilidad del CONTRATISTA respecto a la producción de proceso estará limitada a los costos de cambios o modificaciones en los planos o especificaciones que se necesiten para cumplir los requerimientos de proceso, de acuerdo con la propuesta del CONTRATISTA que se adjunta como Anexo I.

e. En el caso de falla del proceso, el CONTRATISTA no se hará responsable por pérdidas de utilidades del CLIENTE o por costos de materia prima, mano de obra de operación y otros costos de producción.

f. La responsabilidad máxima con respecto a los costos absorbidos por el CONTRATISTA bajo el anterior párrafo *d* de este Artículo 19 no excederá del cincuenta (50) por ciento del total de sumas pagadas al CONTRATISTA como honorarios y/o utilidades sobre los costos directos, de acuerdo con los costos a que se refieren los Anexos II y III.

Artículo 20. Traspaso de Contrato

Ninguna de las partes cederá este Convenio, total o parcialmente, sin el consentimiento de la otra.

Los párrafos anteriores incluyen la mayoría de los términos que ordinariamente se encuentran en contratos por servicios de ingeniería. La política de las organizaciones implicadas y el alcance del contrato afectan los términos y las condiciones.

Una de las bases para cualquier convenio debe ser cierta declaración de intenciones por ambas partes. Por lo general, un convenio puede ser disuelto si cualquiera de las partes puede demostrar que las intenciones de la otra eran fraudulentas. Otro requerimiento de cualquier contrato o convenio debe ser un entendimiento o "encuentro de mentes", como algunas veces se le llama, lo cual es básicamente un entendimiento, entre las partes, de sus obligaciones.

Habitualmente la mayoría de los contratos incluyen declaraciones, tales como las siguientes, para indicar la intención y el entendimiento general.

Artículo 21. Intención

El CONTRATISTA y el CLIENTE aceptan de mutuo acuerdo que estos documentos forman la base de un convenio de trabajo mediante el cual el CONTRATISTA va a realizar ciertos servicios de manera diligente y lo más económica posible, y el CLIENTE va a reembolsar al CONTRATISTA todos los costos normales y razonables, más un porcentaje constituido por los gastos generales y utilidad del CONTRATISTA. Se conviene, además, que ni el CON-

TRATISTA ni el CLIENTE obtendrán ventaja de los errores ni de las omisiones resultantes de interpretaciones diferentes a la intención básica de estos documentos.

Artículo 22. Entendimiento general

El CONTRATISTA y el CLIENTE, por la ejecución de estos documentos, manifiestan haber examinado en detalle su contenido y haber entendido plenamente el alcance de las obligaciones aquí mencionadas, y están en completo acuerdo con todos sus términos y condiciones.

Anexos

En el contrato se hizo referencia a diversos anexos. Los siguientes servirán para ilustrar o describir los requerimientos más importantes.

Anexo I—Propuesta

Una propuesta para un contrato de ingeniería, como éste, por lo general se divide en dos partes constituidas por (*a*) Proceso y (*b*) Especificaciones mecánicas.

Las especificaciones de proceso describen detalladamente el proceso, incluyendo las especificaciones de materia prima y producto acabado, los balances de calor y de materiales y los diagramas de flujo necesarios para describir gráficamente el proceso. Si algunas partes del proceso son diseñadas por terceras personas, la propuesta debe establecer las responsabilidades con toda claridad.

Las especificaciones mecánicas comprenden listas y descripciones de todo el equipo por medio de apuntes y anotaciones. Las especificaciones generales para equipos puramente mecánicos, tales como bombas o compresoras, quedan incluidas con suficiente detalle para permitir a los fabricantes hacer sus estimaciones de precios. De ser posible, se deben incluir los nombres y números de catálogo de los fabricantes de modo que la identificación sea segura, aunque las especificaciones puedan no estar completas en todos sus detalles. Asimismo, se incluyen planos preliminares de distribución de la planta en los que se muestra el alcance de la obra, croquis de los recipientes a presión y hojas de especificaciones para equipo de intercambio de calor, así como especificaciones de diversas partes de la obra, tales como las fases de estructuras, tuberías, instalaciones eléctricas e instrumentación.

La mayoría de las especificaciones incluidas en una propuesta no son completas, ya que una parte considerable de la ingeniería que habrá de efectuarse inmediatamente después de firmar el contrato, consiste en el desarrollo de especificaciones. No es poco común que un CLIENTE prepare especificaciones detalladas completas o las mande preparar, para su propio uso, a una firma de ingeniería al obtener ofertas de otras firmas.

El grado en que las especificaciones estén completas, por lo general depende de los términos del contrato o de los tipos de ofertas o propuestas que se han de obtener. Para contratos a porcentaje, tales como el que se describió anteriormente, las especificaciones mecánicas deben ser breves, en tanto que los contratos a precio fijo requieren especificaciones detalladas. Si el cliente proporciona especificaciones completas, la redacción al principio del contrato es algo diferente. En el contrato anterior, por ejemplo, el Artículo 1 de la Parte I cambiaría, en donde aparecen las palabras "propuesta del CONTRATISTA", para decir "Especificaciones".

Anexo II—Programa de Costos, Mano de Obra

Personal	Rango de Salario o Paga	Sobreporcentaje facturado
1. Gerente de proyecto	600–700/mes	Salarios pagados más 150%
2. Ingeniero de proyecto	500–600/mes	Salarios pagados más 150%
3. Ingeniero de especialidades	500–600/mes	Salarios pagados más 150%
4. Ingeniero de diseño	500–600/mes	Salarios pagados más 125%
5. Jefe de sección	3.15–3.45/hora	Salarios pagados más 125%
6. Diseñador y distribución	3.00–3.25/hora	Salarios pagados más 125%
7. Dibujante principal	2.85–3.15/hora	Salarios pagados más 110%
8. Dibujante	2.50–2.85/hora	Salarios pagados más 110%
9. Tiralíneas, operador de máquina heliográfica	1.50–1.75/hora	Salarios pagados más 50%
10. Escribientes de especificaciones	2.85–3.15/hora	Salarios pagados más 110%
11. Preparador de listas de materiales	2.65–2.85/hora	Salarios pagados más 110%
12. Operador de máquina de dibujar	1.25–1.50/hora	Salarios pagados más 100%
13. Mecanografía de especificaciones o facturas de materiales	1.15–1.25/hora	Salarios pagados más 50%
14. Mecanografía de Oficina	1.10–1.50/hora	Salarios pagados más 50%
15. Personal de procuración, compradores, oficinistas	1.35–1.95/hora	Salarios pagados más 50%
16. Técnicos de laboratorio	2.85–3.15/hora	Salarios pagados más 125%

Para todo el otro personal de las categorías de ingeniería que reciba salarios mensuales, el reembolso no será menor al salario pagado más 110%. Para todo el otro personal de diseño, dibujo, ingeniería u operaciones de oficina sobre base de horas o de semanas, el reembolso no será menor al salario pagado más 75%.

El personal del CONTRATISTA específicamente excluido de las categorías anteriores, o el personal cuyos salarios u otros costos serán absorbidos en los

honorarios o utilidades del CONTRATISTA, es el siguiente: oficiales ejecutivos, jefes de departamento, estimadores, gerentes de oficina, contadores, facturistas, secretarias de ejecutivos, telefonistas, recepcionistas, elevadoristas, mensajeros y porteros. Se considera como excepción el caso en que el CLIENTE solicita específicamente los servicios de dicho personal, debiéndose entonces llegar a un mutuo acuerdo sobre el porcentaje de salario o sobreporcentaje que habrá de ser reembolsado al CONTRATISTA.

Pagos por tiempo extra

Los empleados asalariados o los empleados que no son remunerados por hora pueden recibir pagos del tiempo extra por horas trabajadas equivalentes, como máximo, hasta un 30% del salario mensual normal. Dicho tiempo extra se calcula sobre la base de horas: 8 por día o 40 por semana. La tarifa por hora para el personal remunerado por mes se computa multiplicando el salario fijo mensual por un factor, 0.006. Esto es básicamente igual a la tarifa nominal por horas que le será reembolsada al CONTRATISTA por la paga de este tiempo extra sobre la base de las tarifas antes anotadas con respecto al cálculo de los sobreporcentajes. Considerados por horas, a los empleados remunerados semanalmente se les pagan todas las horas trabajadas sobre 8 por día o 40 por semana, a razón de 1½ veces su tarifa fija por hora. El CONTRATISTA debe ser reembolsado por todas las primas pagadas a tales empleados; sin embargo, los sobreporcentajes anteriores deberán ser aplicados únicamente a las horas trabajadas con tarifas fijas por hora. Como ilustración, supóngase que una persona de la categoría 8 de la lista anterior, con un salario de $2.50/hora, trabajó 44 horas. En la relación del CONTRATISTA al CLIENTE figurarían 46* $\times$ 2.50 = $115.00 más (44 $\times$ 2.50 $\times$ 1.10 = 121) = $236.00.

Anexo III—Programa de Costos, Materiales o Servicios

1. *Comunicaciones.* Costos reales de telegramas, cables, teletipo, llamadas telefónicas locales (en donde así se cobran) y de larga distancia, más 10%. Costos derivados de uso o de arrendamiento de equipo no deberán ser incluidos en los costos al CLIENTE. El CONTRATISTA mantendrá registros exactos de todos estos costos, de acuerdo con los requerimientos del CLIENTE.

2. *Portes terrestres y aéreos, de correspondencia y paquetes.* Costos reales de todos estos conceptos, más 10%. Los registros de costos deben llevarse como en el inciso anterior.

3. *Servicio telefónico.* Cuando el CLIENTE solicite servicio de teléfono o instalación de teléfonos u otros equipos de comunicación, el CONTRATISTA será reembolsado por todos estos costos más 10%.

4. *Espacio y equipo de oficina.* El CONTRATISTA conviene en proporcionar, sin costo, espacio de oficina junto con todos los muebles necesarios de oficina para dos (2) ingenieros del CLIENTE. La ayuda secretarial mecanográfica será reembolsable de acuerdo con el inciso 14 del Anexo II. Se entiende que el personal que por este concepto se asigne al CLIENTE estará al servicio del CONTRATISTA y deberá observar todas las reglas y prácticas comunes requeridas por el CONTRATISTA.

5. *Suministros.* Todos los suministros necesarios, con excepción de los aludidos en el inciso 6, requeridos para el trabajo, deberán ser proporcionados por el CONTRATISTA y ningún costo por dicho concepto será cargado al CLIENTE.

---

* La persona del ejemplo trabajó 4 horas extras que, computadas a razón de 1½ veces, son 6 horas, las cuales sumadas a las 40 semanales de base, dan las 46 horas a que se refiere el autor. (N. del T.)

6. *Servicios de reproducción.* El CONTRATISTA deberá ser reembolsado por todos los costos que contraiga durante la preparación o impresión de copias heliográficas, fotocopias, material mimeografiado o cualquier otro tipo de reproducción, bien sean efectuadas por el mismo CONTRATISTA o bien por una firma exterior, para los requerimientos del CLIENTE. Tales costos deberán estar de acuerdo con las prácticas comerciales estándares locales más 5%. Los costos de mano de obra por operadores de máquinas de copias heliográficas u otro tipo de máquinas serán reembolsados de acuerdo con el inciso 9 del Anexo II, cuando dicho personal trabaje tiempo extra a petición del CLIENTE. Si el CLIENTE lo prefiere, él puede aceptar los cargos por todos los materiales utilizados en la reproducción y reembolsar al CONTRATISTA por la mano de obra empleada en estas operaciones, de acuerdo con lo anotado en el inciso 9 del Anexo II. El CONTRATISTA será reembolsado por los costos de todos los materiales utilizados más 5%.

7. *Servicio de consultorías.* El CONTRATISTA será reembolsado por cualquier servicio requerido de firmas exteriores en los términos acordados con el CLIENTE. Tales costos deben ser facturados al CLIENTE con un sobrecosto de 5%.

8. *Servicio de laboratorio.* Cuando el CONTRATISTA proporcione servicios de laboratorio, los costos de dichos servicios deben ser convenidos antes de iniciar el trabajo. Tales costos deben incluir todos los cargos y no se agregará sobreporcentaje alguno al costo convenido. Si el CLIENTE solicita servicios especiales de laboratorio, las tarifas aplicadas para el personal se computarán de acuerdo con el inciso 16 del Anexo II.

9. *Costos de viajes.* El CLIENTE reembolsará al CONTRATISTA los costos de viaje sufragados por personal del CONTRATISTA que esté viajando a petición del CLIENTE a razón de $12.00 por día para empleados que permanezcan de continuo en una misma localidad por 30 días o más. Para personal que haga viajes cortos o de un día para otro, las tarifas serán razonablemente mayores; no obstante, en ningún caso los viáticos que se carguen al CLIENTE excederán de $15.00 por día.

Los gastos autorizados incluyen el pago de pasajes de primera clase en ferrocarril, incluyendo carro dormitorio, pasajes aéreos, de autobús, taxis, o cualesquier pasajes de transportes públicos; gastos de lavandería y otros gastos normales de viáticos. Los recibos de estos gastos: cuentas de hoteles, talones de boletos y cualquier otra comprobación de pago, deben ser obtenidos de la manera más completa posible y archivados por el CONTRATISTA para ser revisados cuando el CLIENTE lo solicite. Las tarifas fijas antes especificadas se aplicarán a viajes dentro de los límites continentales de los Estados Unidos. En el caso de viajes al extranjero, las tarifas por día deben ser ajustadas a manera de satisfacer las condiciones locales.

Los gastos de comunicaciones telefónicas o de otro tipo deben ser reembolsables; empero, el empleado debe utilizar, de ser posible, llamadas por cobrar con objeto de que puedan conservarse las constancias de estos costos.

Los costos de viajes en automóvil, cuando se cumple con requisitos de aseguramiento, se reembolsarán a razón de 0.10 por milla*. Todos los costos por gastos de viaje en que incurra el CONTRATISTA serán reembolsables de acuerdo con el mencionado sobrecosto de 5%.

Contrato típico de ingeniería y construcción

El contrato completo de ingeniería y construcción, por lo general, es similar a la forma de contrato por servicios de ingeniería, con excepción de que en la Parte II incluye cláusulas adicionales.

* 0.78 pesos mexicanos por kilómetro, sobre la base de 12.50 pesos mexicanos por dólar. (N. del T.)

El siguiente contrato es similar a los que se preparan como tipos de contratos a porcentaje con honorarios fijos. La primera página del documento contiene un título:

Convenio entre
Compañía Química ABC y Compañía de Ingeniería XYZ
Incluyendo los servicios de ingeniería,
procuración y construcción
en la Planta Colorado

La segunda página, o páginas subsiguientes, contienen un índice similar al que se presenta a continuación. Los índices son de mucha utilidad en contratos voluminosos.

INDICE

CONVENIO GENERAL

Este Convenio, que entra en vigor a partir del día —— de —————— y se celebra por y entre la Cía. Química ABC, (domicilio), la que en lo sucesivo se designará como ABC, y la Cía. de Ingeniería y Construcción XYZ (domicilio), la que en lo sucesivo se designará como CONTRATISTA, atestigua que:

Considerando que ABC desea que el CONTRATISTA realice ciertos servicios, descritos de manera más completa en los planos y especificaciones que se adjuntan, enlistan o mencionan bajo el Alcance de la Obra, Artículo I;

Considerando que los pagos que más adelante se especifican habrán de ser hechos por ABC al CONTRATISTA, y considerando las condiciones que aquí se incluyen, las partes que concurren convienen en lo siguiente:

DEFINICIONES

1. *Documentos de contrato.* Todos los papeles, planos y documentos que aquí se adjuntan o incluyen o a los cuales se hace referencia, constituyen los documentos de contrato y, si están por separado, se han de considerar como parte o partes de este convenio, tal como si se adjuntaran al mismo.

2. *Contratista.* Parte interesada en el convenio, la Compañía de Ingeniería XYZ, sus funcionarios ejecutivos, ingeniero de proyecto, superintendente de construcción.

3. *ABC.* La otra parte interesada en el convenio, la Cía. Química ABC, sus funcionarios ejecutivos, ingeniero de proyecto, inspectores, ingenieros de construcción de campo.

4. *Lugar de la obra, Construcción.* Se entiende que las expresiones "sitio de la obra" o "campo" significan el lugar de erección de servicios. Condado Albert, Estado de Colorado, Cía. Química ABC, Planta Colorado. (Se debe incluir la dirección postal.)

5. *Lugar de la obra, Ingeniería.* Domicilio del contratista u oficinas subsidiarias. (Se deben incluir la dirección o direcciones postales.)

6. *Obra.* En el término "obra" se debe entender que se incluye la mano de obra o los materiales, o ambos.

7. *Leyes locales.* Leyes que rigen en el lugar de la construcción.

8. *Sitio de la obra.* Con este término se debe entender que se alude al lugar de la erección o construcción, como se designó en el inciso 4 anterior.

9. *Planos.* Los planos o los impresos son las reproducciones de planos preparados por cualquiera de las partes, pero identificados por escrito como parte del trabajo (véase inciso 6 anterior). Por planos originales se entienden los dibujos originales a partir de los cuales se han obtenido copias o impresiones. Se puede decir que los planos se han de identificar cuando en los documentos de contrato o en los apéndices de los mismos se incluyen los números de identificación de los planos.

10. *Suministros, Materiales de construcción y Materiales.* (*a*) Se entiende que los suministros significan aquellos materiales de naturaleza consumible excluyendo herramientas, tales como tela esmeril, papel lija, vasos para beber, materiales de oficina, combustibles, lubricantes y cualesquier otros renglones que sean necesarios para la construcción, pero que no entran forzosamente en la planta permanente o quedan como parte de la planta después de que la construcción se termina; (*b*) materiales de construcción son materiales más pesados utilizados en la construcción, tales como andamiajes, madera para cimbra, tirantes de amarre (aunque no las varillas de refuerzo); edificios de construcción junto con todas sus partes, incluyendo el alumbrado eléctrico, la plomería y el equipo de calefacción o ventilación; conexiones de servicio eléctrico temporal para equipo de construcción movido eléctricamente, tuberías varias, y diversos materiales a granel de todas clases utilizados para la construcción, pero sacados de la obra antes de la terminación de ella; (*c*) por materiales se debe entender, en general, los materiales permanentes, tales como los componentes del concreto: grava, arena y cemento; ladrillos, mortero, materiales varios de relleno, varilla de soldar, remaches y pernos diversos.

11. *Herramientas de construcción.* (*a*) Herramientas pequeñas, consumibles: desarmadores, pinzas, llaves Stillson y otras llaves de tuercas, con longitud inferior a dieciocho pulgadas (18″); arcos para segueta, seguetas, cinceles, martillos, equipos de soldadura eléctrica y autógena (oxiacetileno), etc.; (*b*) herramientas manuales: con este nombre se designan herramientas más grandes, tales como hachas, palas, azadones, carretillas de rueda, carritos para cemento, diablos, marros, etc.; (*c*) herramientas accionadas, eléctricas o neumáticas, tales como taladros, esmeriladoras, martillos, remachadoras, retacadoras, llaves de impacto para tuercas, etc.; (*d*) herramientas eléctricas pe-

queñas: malacates portátiles, eléctricos o neumáticos, máquinas de doblar y roscar tubería estándar y conduit, compresoras de aire portátiles, máquinas de soldar, etc.; (*e*) máquinas grandes de construcción: huinches accionados eléctricamente o a vapor, tensores y otros tipos de grúas, incluyendo los cables, garruchas, garfios, eslingas, grúas automotrices, máquinas niveladoras, tractores, camiones de carga, etc., incluyendo los accesorios de todas las máquinas mencionadas. Herramientas mecánicas pesadas, instaladas (en base fija), que se usan durante la construcción tales como tornos, taladros de banco, sierras metálicas, etc.

12. *Seguridad.* Debe entenderse que el término seguridad significa la organización de la protección o seguridad de la planta ABC, o la organización proporcionada por el CONTRATISTA para proteger las áreas de construcción.

13. *Predios.* Son las propiedades de ABC, ya sea en áreas inmediatas o adyacentes, u otras áreas de la propiedad de ABC o utilizadas por ABC.

14. *Nombres comerciales, Terminología.* Cuando en descripciones o especificaciones se usan nombres comerciales, deben ser tan aplicables como las descripciones formales. Se entiende que el contratista tiene experiencia en el tipo de trabajo por realizar y en que las expresiones comerciales comunes se aplicarán y serán aceptables.

15. *Equipo.* Cuando el término equipo se incluye en este convenio, se entiende que significa equipo permanente o de proceso para la planta, instalado o erigido o comprado para uso de ABC.

Artículo I. Alcance de la obra

El CONTRATISTA proporcionará todos los diseños, instrucciones, planos, especificaciones, mano de obra, materiales y equipo necesarios, conforme sean requeridos para procurar, fabricar, erigir e instalar, listos para usarse u operarse, así como todo el equipo necesario para proporcionar los servicios y procesos aquí descritos, de acuerdo con la propuesta del CONTRATISTA, la cual se adjunta como Anexo I.

Artículo II. Costos del CONTRATISTA y Condiciones de pago

1. ABC reembolsará al CONTRATISTA todos los costos indicados como costos directos y descritos más adelante, más los porcentajes indicados para las diversas partes de la obra.

2. Los honorarios del CONTRATISTA se computarán como una suma de los sobreporcentajes adicionados a los costos directos del CONTRATISTA y no excederán de ochocientos cincuenta mil dólares (850 000.00), excepto en lo que se indica más adelante.

3. Precio estimado de venta: el CONTRATISTA estima que los costos de mano de obra y materiales y equipo para completar los servicios descritos en el Anexo I, más los honorarios mencionados, no excederán la cantidad de ocho millones seiscientos veinticinco mil dólares ($8 625 000.00) de acuerdo con la estimación detallada que aquí se incluye como Anexo II. El CONTRATISTA no garantiza su estimación, pero conviene en que los honorarios citados en el inciso 2 anterior serán los máximos, aun cuando el costo total estimado sea igual o exceda a la cantidad mencionada.

4. Aumento o Cambio en los honorarios. Los honorarios del CONTRATISTA citados en el anterior inciso 2 sólo serán incrementados o cambiados: (*a*) Cuando el anterior precio estimado total de venta exceda los costos reales de la obra, los honorarios del CONTRATISTA serán incrementados en una cantidad igual al veinte por ciento (20%) de la diferencia entre la estimación del CONTRATISTA y el costo total real, entendiéndose que este aumento habrá de ser una bonificación; (*b*) cuando el alcance de la obra que aquí se

especifica sea aumentado por ABC debido a cambios o adiciones que aumenten el trabajo o el equipo a los materiales del CONTRATISTA, en mutuo acuerdo sobre dichos cambios, los honorarios del CONTRATISTA serán incrementados en una cantidad igual al diez por ciento de los costos reales de tales cambios o aumentos. Todas estas cantidades extras deberán mantenerse por separado de los costos totales de la estimación original y no afectarán la bonificación de la sección (*a*); (*c*) cuando el alcance de la obra que aquí se especifica sea reducido por ABC en forma de cambios o modificaciones, la reducción del costo real se computará como un porcentaje del precio estimado de venta al que alude el inciso 3 anterior y los honorarios del CONTRATISTA serán reducidos en un porcentaje similar. La máxima reducción en los honorarios del CONTRATISTA debida a reducción en el alcance de la obra, no excederá de ciento ochenta y cinco mil dólares (185 000.00), excepto en el caso de cancelación a que se refiere el Artículo IX.

5. Procedimiento de Contabilidad y Facturación.

[*Nota*: Véanse los Artículos 5 y 6 del ejemplo: Contrato para servicios de ingeniería únicamente. El procedimiento de facturación para cualquier contrato en dónde el propietario paga los costos directos más un porcentaje, consiste en la presentación de la factura del contratista adicionada de datos de comprobación en forma de documentos adjuntos o referencias a los registros del contratista. Por lo general, para cargos por mano de obra se deben incluir copias de nóminas reales. Se acostumbra que documentos tales como facturas de vendedores sean conservados por el contratista, ya que a veces se dificulta obtener copias que alcancen tanto para el propietario como para el contratista. Para comprobar un gasto relativo a equipo, el contratista tiene de ordinario tres instrumentos: (1) orden de compra del contratista, (2) un reporte de campo sobre la recepción del equipo y (3) una copia de la factura del vendedor. Estos son suficientes en la mayoría de los casos, puesto que si el contratista reconoce que él posee la factura del vendedor, él está comprometido a pagarla. Por supuesto, es posible dar un paso más y obtener un cheque cancelado, pero por lo común esto no se hace, ya que generalmente el contratista deseará retener sus cheques cancelados como su propio registro positivo.

La facturación de un contrato de construcción e ingeniería es similar a la de un contrato de ingeniería, con la excepción de que se pone más énfasis en la mano de obra total que en la mano de obra de ingeniería. La cantidad retenida por el propietario probablemente sea 10% en vez del 5% que se muestra en el contrato de ingeniería. Con cada facturación regular se acostumbra facturar cierta cantidad fija por concepto de honorarios de ingeniería. La periodicidad de facturación puede ser mensual, bimestral o continua a medida que el contratista acumule facturas. La cantidad retenida puede ser hasta un 25%, aunque 10% es la cantidad más usual.]

Artículo III. Costos directos

Estos se limitarán a los siguientes: (*a*) costos de ingeniería; todos los costos de mano de obra para todo el personal ocupado como ingenieros o uti-

lizado en servicios de ingeniería, como se describe en el Anexo III, más un porcentaje fijo de 125%; (*b*) todos los costos de planta de proceso u otro equipo comprado por el CONTRATISTA para ser instalado en el sitio de la obra, más un porcentaje fijo de 6%; (*c*) costos de material de construcción y de mano de obra; todos los costos de mano de obra para personal de construcción y todos los costos de suministros y materiales de construcción, como se describen en detalle en el Anexo IV, más un porcentaje fijo de 8%.

Artículo IV. Suministros de construcción consumibles, Compras de campo

[*Nota*: Cuando el contrato es básicamente a porcentaje o cuando el CONTRATISTA es reembolsado por todos los costos de construcción, la diferenciación precisa entre los suministros consumibles de construcción es de relativa poca importancia. Algunas veces incluye una cláusula similar a la siguiente:

Se entiende que todos los materiales o suministros (cualesquier materiales) comprados por el contratista para la obra se convierten en propiedad de ABC.

Esta cláusula indica que todos o cualesquier materiales o equipo comprados (y entregados en el sitio de la obra), incluyendo herramientas pequeñas, se convierten en propiedad de ABC y, por consiguiente, no pueden ser retirados del sitio de la obra por el CONTRATISTA. El término comprados también tiende a establecer separación entre los materiales que son propiedad del CONTRATISTA y los que son propiedad de ABC.

Los suministros consumibles se definen hasta cierto grado en Definiciones. Aquí se aplica la siguiente cláusula.]

Todos los materiales menores y suministros de naturaleza consumible requeridos para la obra serán comprados en el sitio de la obra por el comprador de campo. En general, todos los materiales y equipo deberán ser comprados por la organización de procuración del CONTRATISTA en el domicilio de las oficinas del CONTRATISTA; sin embargo, ciertos materiales pueden ser comprados localmente de manera más expedita. Todos los materiales comprados en campo, mencionados, deberán ser registrados por medio de requisiciones y órdenes de compra de campo y se especificarán apropiadamente. Siempre que sea posible dichos materiales se cargarán a una parte específica de la obra o a costos asignados a diversas partes. La recepción, en el sitio de la obra, de todos los materiales citados deberá ser comprobada mediante reportes completos de recepción firmados por un empleado autorizado del CONTRATISTA. El CONTRATISTA mantendrá índices apropiados e índices cruzados para facilitar el trabajo de los auditores de ABC. Las compras mayores de doscientos dólares (200.00) requerirán aprobación previa (*a*) del agente de compras de las oficinas del CONTRATISTA y (*b*) del representante de ABC en el sitio de la obra. Se conviene en que aprobaciones globales previas pueden ser obtenidas para materiales a granel, tales como arena, grava, piedra, concreto premezclados, combustibles, lubricantes y otros materiales similares, siempre y cuando el CONTRATISTA haya obtenido precios de concurso de proveedores.

Artículo V. Materiales de construcción y herramientas, Compras en campo

1. Materiales que se usan en la construcción, tales como los materiales o equipos para cimentaciones y moldes, deben ser especificados y anotados en lista en las oficinas del CONTRATISTA, siempre que esto sea practicable.

Cuando dichos materiales se compren en grandes cantidades a granel, los pedidos principales o globales deberán ser colocados desde la oficina del CONTRATISTA, después de obtener cotizaciones de competencia.

(*Nota*: Esto no se opone necesariamente con lo que establece el Artículo IV, ya que los pedidos principales por los requerimientos totales de cemento o piedra pueden fincarse sobre la base de metros cúbicos o de lotes de carros de ferrocarril. Es preferible que la notificación sobre la prontitud para la entrega de dichos materiales provenga del campo. Cuando básicamente todo el concreto se entrega en el sitio de la obra ya premezclado, los pedidos globales para establecer el precio pueden ser fincados por las oficinas del CONTRATISTA o una oficina de campo, pero la notificación para la entrega debe provenir únicamente de la oficina de campo.)

2. Las herramientas que son propiedad del CONTRATISTA y que se utilizan en el trabajo se facturarán al COMPRADOR sobre la base de renta. Las tarifas para dichas herramientas no deben sobrepasar a las tarifas para igual equipo disponible en el área.

3. Las tarifas de alquiler para equipo especial deben ser estipuladas por mutuo acuerdo de las partes antes de que dicho equipo se use.

4. ABC puede, en cualquier momento, objetar el uso de equipo y solicitar que éste sea retirado de los predios de ABC o hacia un punto de almacenamiento.

5. ABC conviene en pagar todos los fletes y otros cargos incidentales para llevar equipo al sitio de la obra desde cualesquier puntos dentro del territorio de los Estados Unidos Continentales.

6. Se entiende que todos los materiales y equipo, con excepción de las herramientas del CONTRATISTA, son propiedad de ABC desde que se reciben en el sitio de la obra, pero será responsabilidad del CONTRATISTA proteger y mantener todos esos materiales o equipo hasta la fecha de formal aceptación por parte de ABC. El CONTRATISTA erigirá temporalmente cobertizos de almacenamiento o bodegas, o suministrará el resguardo que se requiera para proteger todos esos materiales o equipo.

7. El CONTRATISTA empleará suficientes vigilantes, cuyas hojas de servicios sean aceptables por parte de ABC, para proporcionar protección a la planta durante el periodo de construcción.

8. El CONTRATISTA tomará medidas de protección contra incendio y sostendrá frecuentes prácticas de simulacro de incendio. Los puntos de almacenamiento para materiales o líquidos inflamables deberán ser aislados y dispuestos de mutuo acuerdo entre ambas partes. El transporte, manejo y almacenamiento de todos los materiales inflamables o peligrosos deberá ser de estricto acuerdo con las instrucciones de ABC, denominadas Prácticas Generales sobre Seguridad de la Planta.

Artículo VI. Mano de obra de construcción

1. El CONTRATISTA conviene en cumplir todas las reglamentaciones, órdenes, indicaciones o estatutos federales o locales, aplicables a las prácticas de salarios y empleos, y en proceder de acuerdo con la política de ABC en asuntos que afecten las prácticas locales y pudieran tender a sentar precedentes. Las tarifas de salarios por mano de obra de construcción que figuran en el Anexo IV forman la base de la estimación del CONTRATISTA en el Anexo II. Sin notificar previamente a ABC el CONTRATISTA no entrará, con las

diversas organizaciones laborales empleadas en la obra, en arreglos que tiendan a aumentar las mencionadas tarifas.

2. El CONTRATISTA mantendrá en condiciones adecuadas las facilidades temporales relativas a los servicios higiénicos y de resguardo de sus empleados. Los empleados del CONTRATISTA no invadirán ni harán uso de los servicios higiénicos, o cualesquier otros, de ABC.

3. El CONTRATISTA empleará una competente enfermera registrada y proporcionará en forma continua en el sitio de la obra, durante la construcción, servicios apropiados de reconocimientos y primeros auxilios. También se tomarán las precauciones necesarias para una pronta ayuda médica en el lugar más cercano que proporcione dichos servicios.

4. Cuando estén en los predios de ABC, los empleados del CONTRATISTA deben cumplir todas las reglamentaciones generales impuestas por ABC. Los empleados del CONTRATISTA no deben salir del área de trabajo del CONTRATISTA, ni visitar, sin el permiso o la autorización necesaria, otra parte de los predios de ABC, a menos que estén en la línea de trabajo y/o cuando estén acompañados por un empleado de ABC.

5. El incumplimiento por parte de un empleado del CONTRATISTA de las reglas y prácticas requeridas por ABC, será justificación suficiente para despido.

6. Los empleados despedidos por el CONTRATISTA, o a solicitud de ABC, no serán reinstalados por el CONTRATISTA para trabajar al amparo de este convenio.

7. Los empleados del CONTRATISTA deben ser sujetados a identificación y provistos con gafetes aceptables por ABC para este efecto. El procedimiento para que el personal del CONTRATISTA cumpla las reglamentaciones de seguridad debe ser llevado a cabo de estricto acuerdo con las instrucciones de ABC. El CONTRATISTA mantendrá en el sitio de la obra un expediente individual de cada persona que regularmente se emplee en la obra del CONTRATISTA o que visite de manera intermitente el sitio de la obra. Todos los empleados que visiten el sitio de la obra deben seguir las instrucciones relativas a seguridad e identificación, tal como si estuviesen regularmente empleados en el sitio de la obra. Cualquiera de los oficiales de seguridad de ABC puede, en cualquier momento, solicitar la identificación apropiada y/o la historia del empleo de cualquier personal.

8. A determinado personal del CONTRATISTA se le puede permitir llevar automóviles particulares dentro de los predios de la planta de ABC. Las infracciones a las reglas o reglamentaciones relativas al uso de automóviles automáticamente anularán dicho permiso. En general, todo el personal de construcción usará, de la planta ABC, la puerta que se asigne para entrada del CONTRATISTA. Cuando utilice otras entradas, el personal del CONTRATISTA debe obtener un pase especial de seguridad.

9. Los representantes del vendedor u otras personas que visiten las oficinas del CONTRATISTA para tratos comerciales, deben cumplir con las reglamentaciones de la planta ABC, relativas a los visitantes, y deben ser identificados por personal delegado del CONTRATISTA. El CONTRATISTA debe ser responsable ante ABC por tales personas. A menos que se obtenga un permiso especial, a dichas personas no se les debe permitir el acceso a ninguna parte de la obra que no sean las oficinas del CONTRATISTA.

Artículo VII. Transportación

El CONTRATISTA debe manejar todos los materiales en transportes designados por ABC mediante mapas de tráfico proporcionados para el CONTRATISTA.

Artículo VIII. Terminación de la Obra

1. El CONTRATISTA conviene en proceder con diligencia en beneficio de los intereses de ABC en todas las partes de la obra.

2. A menos que se vea impedido por causas fuera de su control, el CONTRATISTA se propone completar todos los servicios aquí incluidos en un plazo no mayor de dieciocho meses después de la ejecución de este convenio.

3. El CONTRATISTA conviene en programar su obra para completarla de acuerdo con el inciso precedente convenido con ABC y descrito en el Anexo I.

4. Siempre que cualquier parte de la obra se complete y quede lista para operarse, ABC puede tomar posesión de tal servicio y operarlo; sin embargo, la posesión u operación de cualquier parte terminada de la obra no constituirá necesariamente una aceptación por parte de ABC, y el CONTRATISTA estará obligado a completar cualesquier partes no terminadas de dicho servicio y se hará responsable de errores u omisiones descubiertas después de la operación por parte de ABC, tal como si el citado servicio no hubiese sido puesto en operación.

5. Cuando todas las partes de la obra se completen a satisfacción de ABC, ABC entregará al CONTRATISTA una aceptación autorizada, con lo cual todos los fondos o pagos que se adeuden y/o hayan sido retenidos se reconocerán y harán pagaderos al CONTRATISTA.

Artículo IX. Cancelación de contrato

1. Este convenio puede ser cancelado en cualquier momento por ABC mediante un aviso escrito al CONTRATISTA con diez (10) días de anticipación. El CONTRATISTA deberá tener un tiempo razonable para transferir a ABC todas las partes de la obra que estén en su poder. El lapso que se deje después del aviso de cancelación se conocerá como periodo de CANCELACION. En ningún caso el periodo de CANCELACION excederá de treinta (30) días a partir de la fecha de recepción del aviso de cancelación.

2. Si la cancelación se efectúa después de que el CONTRATISTA haya hecho erogaciones por más del cincuenta por ciento (50%) del valor estimado de los materiales de acuerdo con la estimación del CONTRATISTA, que se muestra en el Anexo II, entonces se reconocerá el adeudo de los honorarios del CONTRATISTA, ochocientos cincuenta mil dólares ($850 000.0.), el cual se pagará dentro de los treinta (30) días siguientes a la recepción del aviso de cancelación.

3. Si la cancelación se efectúa antes de que el CONTRATISTA haya hecho erogaciones por más del cincuenta por ciento (50%) del valor estimado de los materiales de acuerdo con la estimación del CONTRATISTA, que se muestra en el Anexo II, entonces los honorarios del CONTRATISTA, ochocientos cincuenta mil dólares ($850 000.00) se reducirán al sobreporcentaje real de la mano de obra y materiales empleados hasta el momento de la cancelación.

4. El CONTRATISTA continuará suministrando todo el personal necesario y hará su mejor esfuerzo para transferir a ABC, de una manera expedita, los datos y otras formas, planos, especificaciones y órdenes de compra como se hayan preparado y usado en la obra. El CONTRATISTA será reembolsado por todos esos costos de acuerdo con los programas de costos y sobreporcentajes aplicables a ellos hasta el momento del aviso, por parte de ABC al CONTRATISTA, sobre la terminación de la cancelación y transferencia de datos y materiales a ABC.

5. En caso de cancelación, ABC tendrá el derecho de entrar inmediatamente en los predios en cualquier momento después del aviso de cancelación y tomar posesión de cualquier parte o partes de la obra que ABC seleccione, junto con todos los materiales y herramientas —bien sean propiedad de ABC o bien del CONTRATISTA— y completar el trabajo. El CONTRATISTA será razonablemente pagado por el alquiler que haya sido convenido con ABC

por el uso de las herramientas del CONTRATISTA o si éste lo prefiere, puede retirar dichas herramientas de los predios, siempre y cuando (*a*) el retiro de tales herramientas no afecte a la terminación de la obra; (*b*) ABC esté de acuerdo con dicho retiro; (*c*) el costo del retiro sea por cuenta del CONTRATISTA. Las herramientas del CONTRATISTA empleadas por ABC para la terminación de la obra serán desmanteladas, cargadas y/o, en caso contrario, preparadas para embarque por ABC. Todos los costos por manejo en fletes u otros costos después de que las herramientas sean cargadas al transporte o abandonen los predios de ABC serán por cuenta del CONTRATISTA, independientemente de que sean manejadas, movidas, cargadas o embarcadas por el CONTRATISTA o por ABC.

6. Todos los materiales o equipo que estén bajo pedido al momento de la cancelación, serán manejados hasta su entrega y facturación indistintamente por el CONTRATISTA o por ABC, según se decida al tiempo de la cancelación del contrato. El CONTRATISTA será reembolsado por todas las facturas que deba o que hayan sido pagadas por él mismo después de la cancelación, de acuerdo con las condiciones aplicables a lo gastado más el porcentaje. Cuando ABC así lo solicite, el CONTRATISTA le transferirá todos los pedidos abiertos o pedidos cuyos materiales no hayan sido entregados. En tal caso, el vendedor será notificado de la transferencia por el CONTRATISTA y cambiará, de manera correspondiente, su procedimiento de facturación. En el caso de que dichas facturas sean remitidas al CONTRATISTA para su pago, entre las dos partes habrá de llegarse a un mutuo acuerdo con respecto al método más expedito de manejo. Siempre que el CONTRATISTA sea requerido para procesar y facturar dichas facturas, deberá ser reembolsado por tales costos más el porcentaje especificado.

7. En el caso de que la cancelación de este convenio se deba a la decisión de ABC para descontinuar la obra o a otras causas fuera del control de ABC, con respecto a la terminación de la obra, todos los convenios que aquí figuran se aplicarán como lo señalan los párrafos precedentes de este Artículo IX con las siguientes especificaciones:

7.1. El CONTRATISTA procederá inmediatamente a cancelar todas las órdenes de compra por materiales o equipo no entregado, avisando a cada vendedor por telegrama o teletipo de la intención de cancelar dichas órdenes e indicando más tarde a cada uno de ellos el interrumpir los trabajos relativos a dichas órdenes. El vendedor avisará de los cargos de cancelación y, de existir éstos, él deberá notificar detalladamente de tales cargos al CONTRATISTA. El CONTRATISTA avisará entonces inmediatamente a ABC de dichos cargos y solicitará una declaración de aceptación por parte de ABC.

7.2. ABC reembolsará al CONTRATISTA todos los costos mencionados, bien sean costos de cancelación del vendedor u otros costos resultantes de la cancelación.

7.3. En general, ABC rescatará cualesquier renglones sobre los cuales la cancelación sea el 100% del precio de compra, aunque el CONTRATISTA avisará a ABC de dichos cargos antes de que el vendedor sea notificado para continuar.

Artículo X. Protección de materiales y de la propiedad

1. En adición a las condiciones del anterior Artículo V, el CONTRATISTA y otros contratistas o subcontratistas empleados en el área o áreas de trabajo del CONTRATISTA procederán en todo momento en función de los mejores intereses de ABC y protegerán con toda su capacidad la propiedad, equipo y herramientas de este último.

2. El CONTRATISTA será considerado como el contratista principal en los predios de ABC y será el responsable del trabajo y acciones de todas las otras

firmas contratistas o subcontratistas empleadas por él mismo. El CONTRATISTA notificará inmediatamente a ABC de cualesquier prácticas peligrosas seguidas por otros contratistas no empleados por él mismo. En ausencia del representante autorizado de ABC, el CONTRATISTA actuará por criterio propio para prevenir o evitar por parte de terceras personas cualesquier acciones que pudieran resultar en perjuicio de la propiedad o poner en peligro al personal o a la obra.

Artículo XI. Seguros

El CONTRATISTA suministrará todos o cualquiera de los seguros que puedan ser requeridos por ABC y será reembolsado por todas las primas pagadas por dichos seguros.

Artículo XII. Garantías

1. El CONTRATISTA garantiza todo el trabajo, materiales, y equipo diseñado o fabricado por él mismo, contra fallas por diseño o manufactura defectuosos por un periodo que no exceda de un (1) año, a partir de la primera fecha de instalación u operación, pero no mayor de dieciocho (18) meses a partir de la fecha de entrega en el sitio de la planta, liberando a ABC de todos los costos de sustitución, exceptuando los de fletes, siempre y cuando el equipo esté siendo o haya sido utilizado del modo o manera para el cual fue diseñado. El CONTRATISTA no puede garantizar el equipo mecánico y otro equipo comprado como especial y manufacturado por terceras personas fuera de la garantía del fabricante del equipo; empero, el CONTRATISTA conviene en hacer cuanto esfuerzo esté de su parte por obtener las mejores garantías posibles para todo el mencionado equipo.
2. El CONTRATISTA no garantiza ningún equipo contra falla o perjuicios debidos a efectos corrosivos de fluidos u otros materiales, a menos que el equipo haya sido específicamente diseñado para soportar, como parte del proceso, las condiciones causadas por el fluido en cuestión.
3. El CONTRATISTA conviene en hacer en el proceso, sin costo para ABC, cualesquier modificaciones mecánicas, cambios o correcciones que sean necesarios para proporcionar la producción y calidad de productos señalados en la propuesta del CONTRATISTA, Anexo I, siempre y cuando las materias primas o fluidos que se han de procesar posean las características que constituyeron la base para diseño y que la operación de los procesos se mantenga por periodos suficientes para probar la producción.
4. El CONTRATISTA no se hará responsable de pérdidas de utilidad o de costos operacionales o de costos de fluidos, materiales o servicios utilizados en las pruebas de aceptación.

Artículo XIII. Traspaso de contrato

Este contrato no será traspasado por cualquiera de las partes de este convenio, excepto y a menos que entre ambas se llegue a un mutuo acuerdo a este respecto.

Artículo XIV. Materiales sobrantes

1. El CONTRATISTA conviene en poner todo lo que esté de su parte para evitar la acumulación de cantidades irrazonables de materiales; sin embargo, cuando se encuentre que existe un sobrante, el CONTRATISTA notificará inmediatamente a ABC la existencia de dicho sobrante, dando detalles del pedido original, costo y especificación. ABC avisará entonces por escrito al CONTRATISTA si dicho material ha de transferirse a los servicios de almacenamiento de ABC o si ha de ser vendido. En este último caso, el CONTRATISTA intentará primero devolver el material o equipo al vendedor original. Si el pedido no puede ser devuelto, entonces el CONTRATISTA puede liquidarlo al mejor precio que pueda obtener. Cuando el equipo o material pueda ser regresado al vendedor, el CONTRATISTA puede aplicar su propio criterio

en la aceptación de los cargos de realmacenamiento por parte del vendedor, sin posterior notificación a ABC.

2. Todos los materiales sobrantes que queden o se acumulen a la fecha de aceptación, por parte de ABC, de la planta terminada, serán aceptados por ABC y movidos o almacenados según indique.

3. Todo el equipo que resulte sobrante será protegido pintándolo y almacenándolo de acuerdo con las instrucciones de ABC. El equipo que deliberadamente se deje deteriorar, oxidar, o de alguna otra manera se perjudique por la negligencia de los empleados del CONTRATISTA, pasará a ser propiedad de éste, y todos los costos de dichos materiales o equipos, incluyendo los honorarios del CONTRATISTA devengados sobre tales renglones, serán deducidos de los pagos al CONTRATISTA.

Anexos para contratos de ingeniería y construcción

En el contrato anterior se ha hecho referencia a diversos anexos. La discusión al final del contrato de ingeniería ha descrito, con cierto detalle, una propuesta típica. Para un contrato tal como el anterior, la propuesa sería más detallada, describiendo además del proceso y equipo de proceso todos los servicios, tipos de arquitectura y cualesquier puntos que pudieran ser peculiares de la instalación en particular.

El Anexo II, la estimación, sería en este caso bastante detallado. Algunas veces se usa la siguiente forma. A continuación se incluye la primera parte de una estimación o resumen de ese tipo, así como la estimación para la unidad *A*.

ANEXO II – ESTIMACION, DOLARES

1. Estimación combinada

Servicios	Ingeniería y oficina	Materiales	Mano de obra	Totales
Unidad *A*	166 000	3 026 000	804 000	3 996 000
Unidad *B*	93 000	1 700 000	510 000	2 303 000
Unidad *C*	25 000	470 000	120 000	615 000
Servicios de fuerza	6 000	112 000	33 000	151 000
Servicios generales	12 000	207 000	48 000	267 000
Edificios de la planta	18 000	340 000	85 000	443 000
Subtotales	320 000	5 855 000	1 600 000	7 775 000
Honorarios				850 000
Total combinado de estimaciones y honorarios				8 625 000

2. Estimación – Unidad *A*

	Materiales	Mano de obra	Totales
Cimentaciones	95 000	115 000	210 000
Acero estructural y edificios	184 000	126 000	310 000
Equipo de proceso	1,890 000	230 000	2 120 000
Tubería	619 000	226 000	845 000
Material eléctrico	96 000	59 000	155 000
Instrumentación	142 000	48 000	190 000
Subtotales	3 026 000	804 000	3 830 000
Ingeniería y oficinas			166 000
Total, Materiales, Mano de obra, Unidad *A*			3 996 000

En la práctica real las estimaciones son mucho más detalladas. La estimación anterior para la Unidad *A* está condensada. El renglón "equipo de proceso" incluye todo el equipo mecánico, recipientes a presión, tanques, intercambiadores de calor, equipo de condensación y aislamiento. Los costos estimados de cada uno de estos renglones se mostrarían por separado. En el anexo habitual correspondiente a una estimación, también se presentan separadamente renglones generales, como los de supervisión y operaciones de oficina relativas a la construcción.

Los diversos anexos que se adjuntan a un contrato a porcentaje, incluyen generalmente información bastante detallada sobre tarifas de oficios referentes a la construcción, sobre suministros consumibles y sobre tarifas de alquiler de las herramientas del contratista.

Formas de contrato a precio alzado

El contrato a precio alzado o precio fijo es mucho menos elaborado, y en esta obra no se ha incluido una forma típica de tales contratos. Puesto que se debe establecer un precio fijo, las especificaciones originales y las descripciones detalladas del trabajo y tipos de equipo se incluyen en la propuesta del contratista o en la solicitud de presupuesto del propietario. En estas condiciones el contrato únicamente necesita llevar las cláusulas estándares generales.

CONTRATOS E INGENIEROS

En la ingeniería de proyecto la fase de contrato requiere de un competente departamento legal. Miembros ideales de este grupo son las personas que tienen experiencia tanto en ingeniería como en leyes.

Todos los ingenieros de proyecto, no obstante, deben tener conocimientos sobre contratos, ya que su obligación consiste en ejecutar muchos de los términos de un contrato. Al desarrollar dichos conocimientos, el ingeniero debe evitar una actitud de crítica excesiva hacia la terminología legal. Debe recordarse que las frases largas, las palabras grandes y las expresiones legales acostumbradas son parte de la tendencia conservadora de una práctica legal y han comprobado su estabilidad a través de varias décadas de decisiones legales.

LA ETICA Y EL CONTRATO

Entre contratistas o propietarios de sólida reputación nunca existe intención alguna para engañar mediante un texto muy elevado o una terminología muy confusa. El contrato más bien debe ser pensado como un convenio escrito entre caballeros. Se hace por escrito, porque la memoria suele fallar, y los documentos escritos con-

tribuyen mucho a conservar las relaciones comerciales amistosas. Legalmente, el contrato previene los casos de cancelación y las penas por incumplimiento, aunque estas acciones cuestan tiempo y dinero para ambas partes.

Pero sobre todas las cosas, la integridad y la competencia técnica del personal de ambas organizaciones son los únicos criterios para el éxito de un proyecto de planta. El contrato protege contra la negligencia y actos ilegales voluntarios, mas no puede proteger a ninguna de las partes contra prácticas fuera de ética o contra incompetencia.

REFERENCIAS

1. Eshbach, O. W., *Handbook of Engineering Fundamentals*, 2a. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1952.
2. McCullough, L. B. y J. R. McCullough, *The Engineer at Law*, Vol. I, Iowa State College Press, Ames, Iowa, 1946.
3. Sadler, W. C., *Legal Aspects of Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1940.
4. Sadler, W. C., *The Specifications and Law on Engineering Works*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
5. Simpson, L. P. y E. R. Dillavon, *Law for Engineers and Architects*, 3a. Ed., West Publishing Co., St. Paul, Minn., 1946.

PARTE III

DETALLES DE LOS DISEÑOS INGENIERILES Y SELECCION DE EQUIPO

El ingeniero de proyecto de una planta de procesos, debe conocer los detalles de los diseños ingenieriles para participar inteligentemente en el diseño del proceso, cimentaciones y estructuras que se tengan en el proyecto.

CAPITULO 12

RECIPIENTES

El diseño y fabricación de recipientes de diferente tipo, tamaño y forma, es una labor muy complicada que requiere de la participación de los ingenieros de proceso y proyecto, del diseñador del recipiente y del fabricante. El diseño de recipientes requiere de la experiencia de ingenieros especializados en este campo. Para este trabajo se requiere dedicación completa y con el fin de solucionar el problema, deben conocerse los diferentes códigos y propiedades de los materiales que intervienen en su fabricación, los ingenieros encargados del proceso y proyecto deben familiarizarse con el diseño básico y con los procesos de fabricación, por lo que resulta muy necesario el intercambio de las ideas que se tengan con el diseñador de recipientes.

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar los antecedentes e información que ayude al ingeniero de proyecto a conocer el diseño y la fabricación de recipientes usados en dicho proyecto. No es posible desarrollar todos los detalles del diseño del recipiente y no se va a repetir la información proporcionada en los códigos que se encuentran al alcance de quien los solicite.*

FABRICACION DE RECIPIENTES

La cubierta

Los recipientes y depósitos que se usan en las plantas de procesos, por lo general son de forma cilíndrica, y para darles forma de cilindro se usan rodillos dobladores para flexionar la lámina.

* A menos que se mencionen otros, los códigos referidos en esta sección son el API-ASME y el ASME para "Unfired Pressure Vessels".[1,2]

En la Fig. 12-1 se muestra un sistema laminador. Las fuerzas para flexionar la lámina, se aplican a través del rodillo superior y el diámetro de la cubierta se controla de acuerdo a las distancias que se tengan entre los rodillos superior e inferior. Las placas de tamaño pequeño pueden rolarse en frío. Antes de proceder al rolado, se cortan los extremos de la placa de una longitud tal que permita construirse la cubierta de acuerdo al radio deseado; con este procedimiento se pueden construir recipientes perfectamente redondos Terminado el rolado se procede a soldar los extremos de la placa.

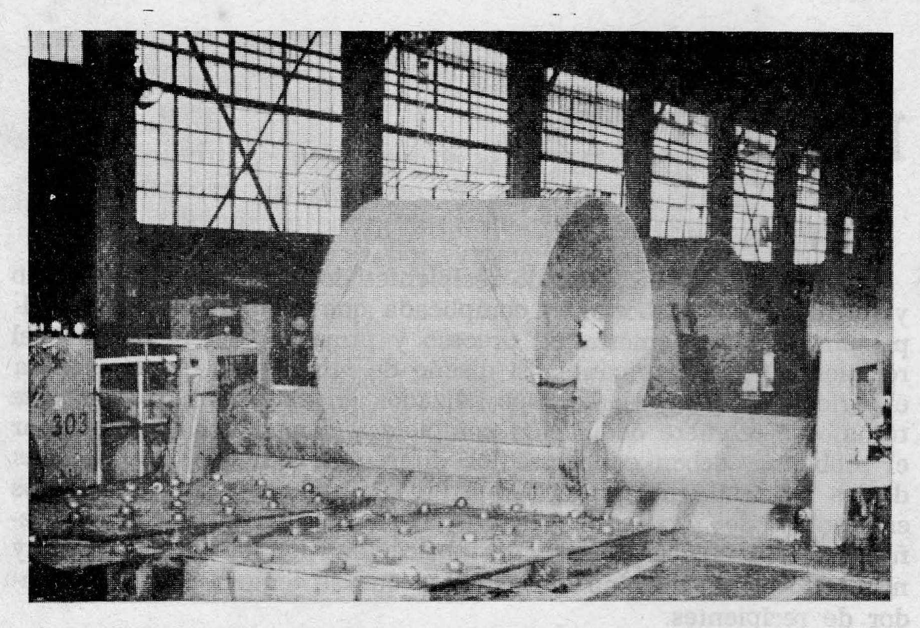
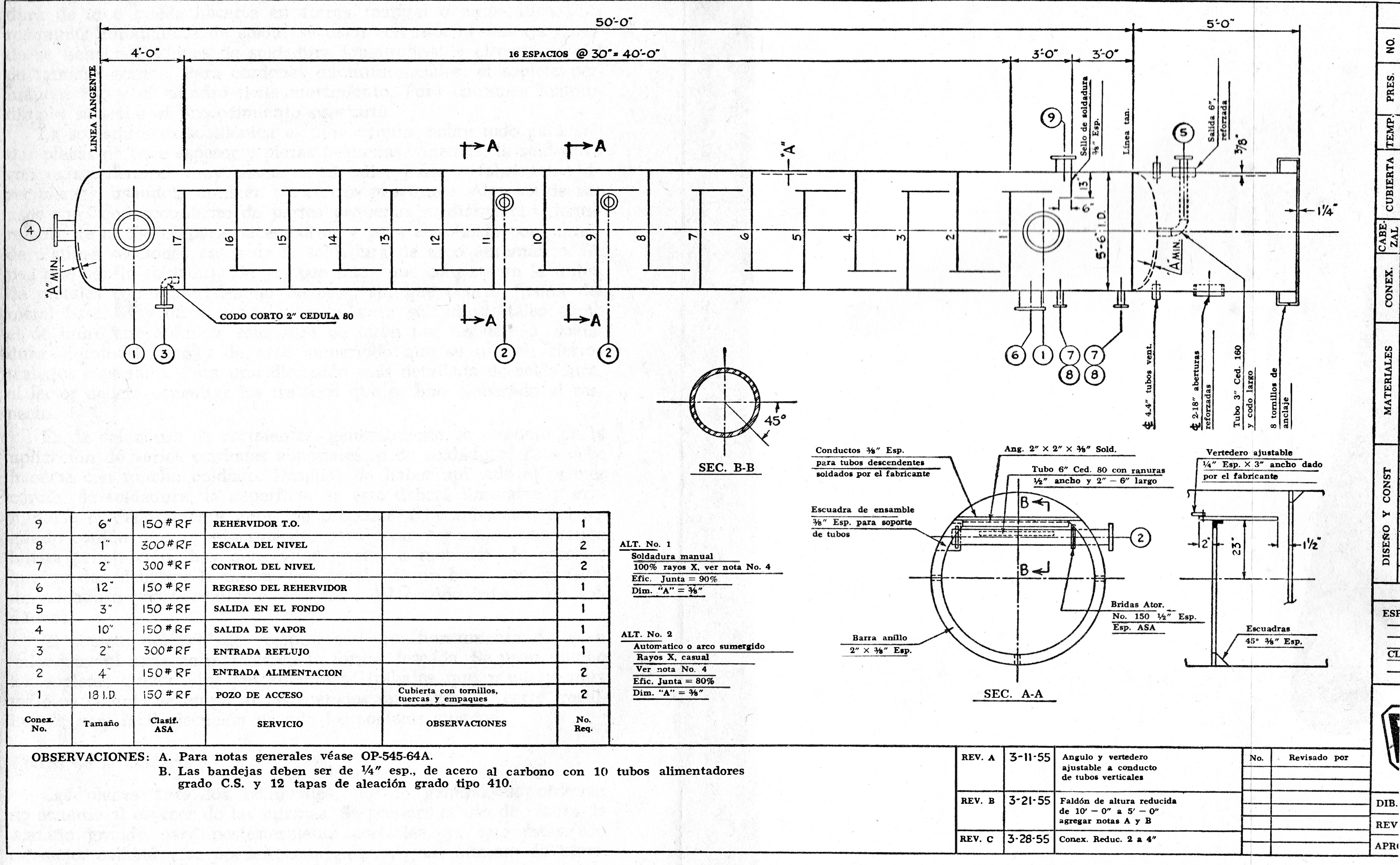


Fig. 12-1. Rodillos dobladores de 244 plg de longitud, cubierta de 96 plg diá exterior, rolándose una placa de ⅜ plg. (Cortesía de Lukens Steel Company)

Soldadura

La soldadura es el método más comúnmente usado para la unión de metales. En las pruebas de estallido se ha demostrado que la soldadura es más resistente que la placa misma de la cubierta. Sin embargo, el trabajo de soldadura deberá efectuarse con soldadores competentes. En diferentes códigos de recipientes[1,2] se especifican las pruebas para calificar a los soldadores.

Se usan diferentes procesos de soldadura. Quizá la soldadura de arco es la más utilizada en la construcción de recipientes. El arco se produce entre el electrodo metálico y el metal de la base. El calor producido causa la fusión del electrodo y parte del metal de la base que está próximo al arco. Las varillas de soldadura (electrodo) son cubiertas con un fundente que cuando se calienta, produce un gas



Conex. No.	Tamaño	Clasif. ASA	SERVICIO	OBSERVACIONES	No. Req.
9	6"	150 # RF	REHERVIDOR T.O.		1
8	1"	300 # RF	ESCALA DEL NIVEL		2
7	2"	300 # RF	CONTROL DEL NIVEL		2
6	12"	150 # RF	REGRESO DEL REHERVIDOR		1
5	3"	150 # RF	SALIDA EN EL FONDO		1
4	10"	150 # RF	SALIDA DE VAPOR		1
3	2"	300 # RF	ENTRADA REFLUJO		1
2	4"	150 # RF	ENTRADA ALIMENTACION		2
1	18 I.D.	150 # RF	POZO DE ACCESO	Cubierta con tornillos, tuercas y empaques	2

OBSERVACIONES: A. Para notas generales véase OP-545-64A.
B. Las bandejas deben ser de 1/4" esp., de acero al carbono con 10 tubos alimentadores grado C.S. y 12 tapas de aleación grado tipo 410.

			No.	Revisado por
REV. A	3-11-55	Angulo y vertedero ajustable a conducto de tubos verticales		
REV. B	3-21-55	Faldón de altura reducida de 10' – 0" a 5' – 0" agregar notas A y B		
REV. C	3-28-55	Conex. Reduc. 2 a 4"		

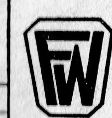
FIG. 12-7. Dibujo ingenieril completo de un recipiente. (Cortesía de Foster Wheeler Corporation)

DATOS DEL RECIPIENTE

NO.	PARTIDA	E-2
	No. DE PIEZAS	UNO
PRES.	DISEÑO	75 lb/plg² Manom.
	OPERACION	50 lb/plg² Manom.
	PRUEBA	VER ALTS.
TEMP.	DISEÑO	470°F
	OPERACION	420°F
CUBIERTA	DIAMETRO INTERIOR	5'-6"
	LONG. ENTRE TANG.	50'-0"
	ESPESOR	VER. ALTS.
	CORRECCIONES INCL.	1/8"
CABE-ZAL	TIPO	2:1 ELIPTICA .
	ESPESOR MINIMO	VER ALTS.
CONEX.	CARACT. AGUJERO HOMBRE	150 No. ASA 1/16" R.F.
	AG. HOMBRE FIJO, ART.	FIJO
	CARACT. DE TOBERAS	VER GRAFICA 1/16" R.F.
	CONSTRUCCION	VER O.P.-545-64A
MATERIALES	CUBIERTA Y CABEZALES	A 285 GR "C" FBX
	BANDEJAS	ACERO AL CARBONO
	OTRAS PZAS. INT.	ACERO AL CARBONO
	TORNILLOS INTERIORES	ACERO AL CARBONO
	TORNILLOS EXTERIORES	VER OP-545-64A
	EMPAQUES EXTERIORES	EMP. ASB. COMP. 1/16"
	SOPORTES	ASTM A-7
DISEÑO Y CONST	ESPEC. F.W.	CODIGO APL-ASME 1951
	ESPEC. DEL CLIENTE	NINGUNA
	REL. DE ESFUERZOS	NO
	RADIOGRAFIA	VER OP-545-64A
	EFICIENCIA JUNTA	VER ALTS.
	PINTURA	NO
	AISLAMIENTO	SI
	EMBARQUE	UNA PIEZA

ESPECIFICACIONES PARA: E-2 PARTIDOR

CLIENTE:



Este dibujo es propiedad de

FOSTER WHEELER CORPORATION

165 Broadway, New York

DIB. POR	Hau.	3-10-55	ESCALA: 1/4" -1'-0"	
REV. POR	R.E.L.	3-21-55	OP-553-79C	
APROB. POR				

inerte alrededor del arco y deposita una cubierta protectora sobre el cordón de soldadura protegiéndolo contra la corrosión. La soldadura de arco puede hacerse en forma manual o automática. Las máquinas automáticas de soldar se usan con mucha ventaja cuando se tienden cordones de soldadura longitudinal y circunferencial de tamaño grande. Para cordones circunferenciales, el soplete permanece fijo y el cilindro tiene movimiento. Para cordones longitudinales se sigue el procedimiento contrario.

La soldadura oxiacetilénica es muy común, sobre todo para soldar placas de poco espesor y piezas pequeñas. Además, la soldadura con oxiacetileno es muy usada en el taller para la fabricación de recipientes, usándola también para otros propósitos. Algunos de sus usos son: endurecimiento de partes pequeñas mediante el calentamiento de la flama, para hacer cortes y para el soldado por puntos de algunas secciones antes de la soldadura de arco automático. Se usa también la soldadura de gas con latón que consiste en la unión de metales con materiales no ferrosos, sin que ocurra fusión del metal base. Hay otros procedimientos para soldadura, tales como el de hidrógeno atómico, soldadura de latón por resistencia, soldadura aluminotérmica y de arco sumergido que se usa en ciertos trabajos especiales. Para una discusión más detallada de soldadura, el lector deberá consultar los trabajos que se han elaborado al respecto.

En la soldadura de recipientes, generalmente se requiere de la aplicación de varios cordones superpuestos de soldadura. Esto debe hacerse con mucho cuidado. Después de haber aplicado el primer cordón de soldadura, la superficie de éste deberá limpiarse y examinarse cuidadosamente antes de proceder a la aplicación del segundo cordón que va superpuesto, para estar seguro de que tenga buena penetración, hay que evitar grietas e inclusión de escorias que puedan debilitar la unión. Por debajo de un buen cordón final de soldadura podrá ocultarse una falla del cordón inferior de soldadura.

El soplete del soldador resulta ser una herramienta de gran valor para el corte de metales en la forma deseada. Se usan mucho los sopletes guiados mecánicamente y, trabajos que resultan muy tediosos cuando se emplean los métodos ordinarios de corte, resultan de muy fácil ejecución usando los sopletes guiados.

Placas de la cubierta

Las placas para los recipientes, por lo general, se ordenan de acuerdo al espesor de las mismas. Se prefiere el uso de placas de tamaño grande para posteriormente cortarlas, ya que éstas son de mejor calidad y se pueden conseguir en gran número de tamaños. Estas pueden obtenerse en gran variedad de espesores, siendo los más comunes los de $\frac{3}{16}$ plg a 1 plg en incrementos de $\frac{1}{16}$ plg;

de 1 plg a 1½ plg en incrementos de ⅛ plg y de 1½ plg a 4 plg en incrementos de ¼ plg. Las placas más delgadas se producen en longitudes hasta de 800 plg. El ancho máximo obtenible es de 195 plg, aunque se considera un cobro extra para las de más de 100 plg de ancho. Para el caso de que tanto la longitud circunferencial como la longitudinal sean mayores de 195 plg, será necesario emplear dos o más placas en la fabricación del recipiente (Fig. 12-2). En ciertos casos resultará más económico usar más de una placa, como en el caso de trabajar en donde se necesiten placas de más de 100 plg de ancho; esto es debido al cargo extra que se hace para placas de 100 o más plg de ancho. Se deben hacer comparaciones de los costos adicionales de fabricación en caso de utilizar una o bien varias placas.[14]

Cabezales de los recipientes

Idealmente el recipiente esférico es el más adecuado para resistir presiones altas. Los recipientes esféricos se usan para almacenar líquidos y gases volátiles, pero su uso no resulta muy apropiado en procesos comunes. El recipiente cilíndrico le sigue en

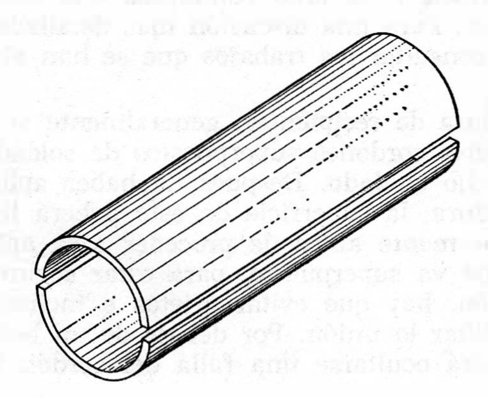


FIG. 12-2. Cubierta fabricada con más de una placa

cuanto a mejor diseño, siendo éste el más extensamente usado. Los cabezales de estos cilindros, pueden ser planos, elipsoidales (cóncavo elíptico), cóncavo hemisférico, o cónico. En la Fig. 12-3 se dan ejemplos de varios diseños. El cabezal plano es muy económico, se le emplea solamente para recipientes pequeños (3 pies o menos) o en recipientes sujetos a presiones bajas. Los cabezales planos pueden soldarse a los recipientes, o instalarse como bridas ciegas en recipientes pequeños.

Los cabezales que no son planos pueden construirse troquelados o repujados aplicando fuerza a una placa que tenga rotación, hasta darle la forma deseada. Se pueden construir por rotación, cabezales desde 12 hasta 20 pies de diámetro. Los cabezales pequeños pueden

ser troquelados y, para que resulte económico, se requiere de la construcción de un gran número de éstos.

Por lo general, las necesidades del proceso indican el cabezal que debe usarse. Por ejemplo, en un depósito de decantación, el cabezal inferior debe ser cónico. En caso de poder escoger el tipo de cabezal, se escogerá el más económico de entre el hemisférico, cónico estándar y elipsoide. Como el espesor necesario para resistir una presión dada, se incrementa en el orden de hemisférico, elipsoide y cónico, el costo de su fabricación disminuye en el mismo orden. Aunque resulta difícil generalizar, puede afirmarse que el cabezal cónico estándar puede usarse con intervalo de presiones desde un valor bajo hasta valor moderado. Para presiones altas (arriba de 200 lb/plg^2) probablemente resulte más económico usar el elipsoide (cóncavo elíptico) con una relación 2:1 de eje mayor a menor. Se construye una gran variedad de cabezales estándar de uso muy común. El uso de los cabezales no estándar implica la construcción de matrices adicionales para la formación del cabezal, con lo que se incrementa el costo de los mismos.

Toberas

Todos los recipientes de un proceso utilizan toberas para la entrada de los fluidos y desagües en las salidas del recipiente, para su inspección necesitan agujeros hombre y registros de mano. Las toberas pueden fabricarse de tubo, de uniones de tubos, de acero forjado, de acero fundido o de algún otro material apropiado que esté de acuerdo a lo especificado en los códigos. Aun cuando los códigos[1,2] permiten el uso de aditamentos soldados o enroscados, por lo general se evita el uso de estos últimos.

La cubierta del recipiente se debilita al taladrar los agujeros para la instalación de las toberas; por lo tanto, la cubierta deberá reforzarse en las vecindades de la tobera. En los códigos,[1,2] se dan reglas detalladas para la colocación de refuerzos. Muchos fabricantes producen en serie las gargantas de las toberas con material de acero forjado y de longitud suficiente para colocar al fluido más allá del aislamiento, éstas se fijan mediante soldadura. Las toberas son de longitud estándar, ya sean compradas o fabricadas de tubo, esta longitud se toma en cuenta en el diseño del recipiente. Se pueden también conseguir las toberas llamadas de tipo soldable. Estas toberas se construyen con refuerzo en la garganta y no es necesario poner refuerzos adicionales.

Se utilizan coples de tubo para drenes y ventilas pequeñas de una pulgada o menos. Se taladra o corta en la cubierta del recipiente, un agujero menor que el diámetro interior del cople, el cual después es soldado en la cubierta del recipiente. No se considera adecuado usar niples en lugar de coples, ya que durante la insta-

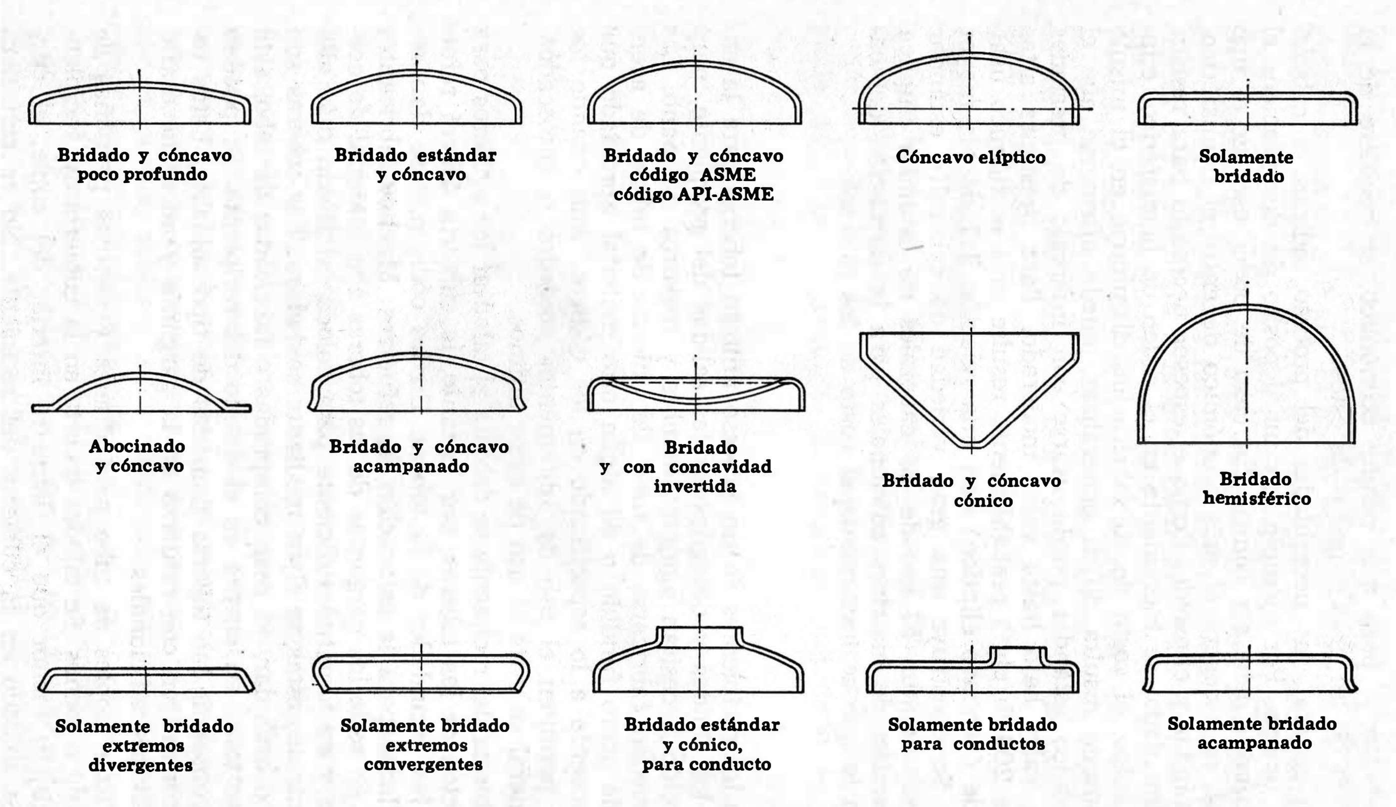


FIG. 12-3. Tipos de cabezales para recipientes cilíndricos a presión. (Cortesía de Lukens Steel Company)

lación las roscas están constantemente expuestas y fácilmente podrán dañarse.

Interiores del recipiente

Los recipientes usados en los procesos tienen en su interior muchos aditamentos, los cuales son necesarios para poder efectuar los cambios en los materiales que pasan por su interior. Entre éstos se incluyen bandejas de burbujeo, empaques y soportes de los empaques para las torres de destilación, tubos calentadores, placas deflectoras, agitadores y otros equipos similares. Por lo general, los fabricantes de recipientes no fabrican los interiores de los mismos ya que muchos de éstos son de diseño especial y requieren determinada técnica de alguna empresa particular. Las bandejas y tapas de burbujeo representan un ejemplo típico de lo que debe ser comprado a una compañía especialista. Sin embargo, el fabricante de recipientes sí proporciona los soportes de las bandejas de burbujeo.

En la actualidad, se usan mucho tapas de burbujeo de placa ligera, de acero de cierta aleación, y el problema de sus soportes es mucho menor que cuando se usaban bandejas de hierro fundido. En la Fig. 12-4 se muestra un arreglo típico moderno de una bandeja de burbujeo en la cual se muestran estructuras para soportarla y los ensambles de la tapa. Se usan mucho rejillas y placas perforadas, el soporte de las mismas no representa ningún problema por el poco peso de las bandejas.

Es de desearse que los interiores del recipiente sean diseñados de tal modo que puedan sacarse fácilmente del pozo de acceso. Con las piezas de tamaño grande, la disposición debe ser tal que éstas puedan sacarse por secciones.

Accesorios externos

Además de las toberas, registro de inspección y orificios de limpieza que hay en los recipientes, se necesita de ciertos accesorios exteriores, tales como ángulos para soportar el aislamiento, orejas y varias ménsulas para soportar plataformas y escaleras que deben ir fijas a los recipientes y placas para soportar la torre a la elevación requerida. Estos accesorios son suministrados por el fabricante del recipiente y son soldados a éste antes del embarque. Normalmente se usa acero de grado estructural.

Relevación de esfuerzos

Se producen esfuerzos residuales alrededor de los cordones de soldadura que se aplican en los recipientes. Estos esfuerzos debilitan al recipiente en dichos puntos, particularmente en los recipientes de pared más gruesa (de más de 1¼ plg). Para estos casos y en todos los que se requiera de la máxima seguridad, deberán relevarse

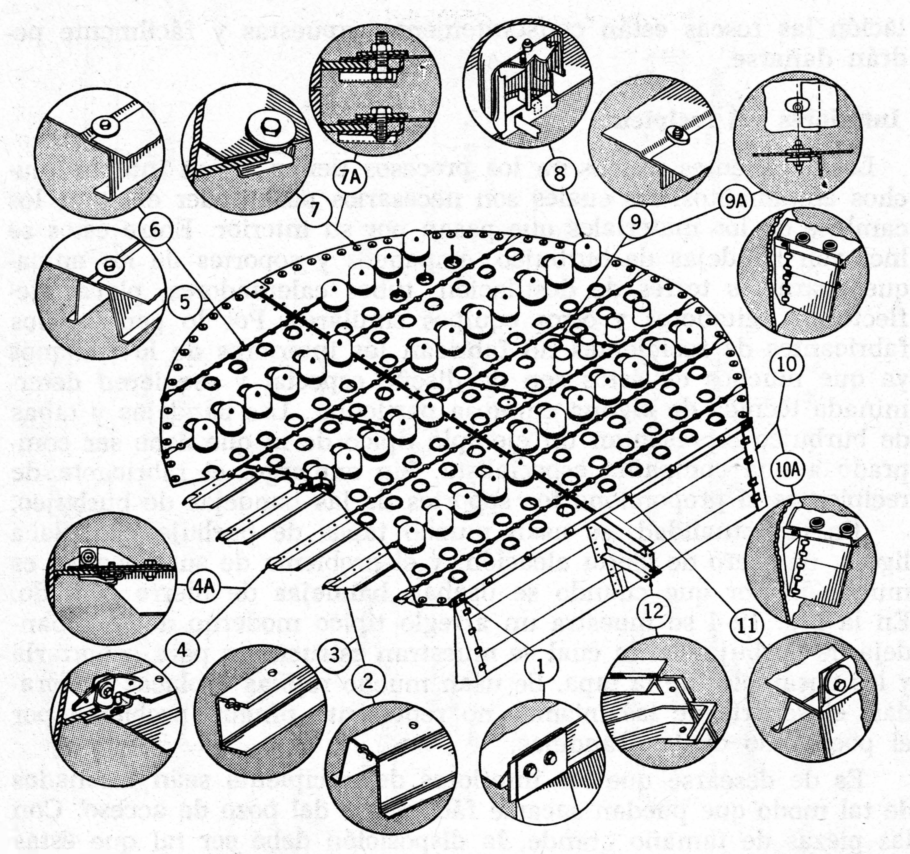


Fig. 12-4. Bandeja de burbujas. (Cortesía de Fritz W. Glitsch & Sons, Inc.)
Clave:

1. Placa sellada de vertedero ajustable.
2. Viga armada trapezoidal.
3. Viga en forma de canal.
4. y 4A, soporte para suspensión de armaduras.
5. Junta de expansión térmica entre las bandejas del piso y armaduras de soporte.
6. Soporte secundario.
7. y 7A, grapas periféricas para las bandejas.
8. Tapa desmontable y ensamble para levantarla.
9. y 9A, mecanismo para oprimir las bandejas del pozo de acceso.
10. y 10A, barras para fijar los tubos de descenso.
11. Vertederos ajustables.
12. Viga principal.

los esfuerzos para eliminar los esfuerzos residuales. Los códigos[1,2] especifican eficiencias altas en las juntas que tienen relevación de esfuerzos.*

La relevación de esfuerzos consiste de un proceso de recocido o tratamiento térmico para relevar los esfuerzos residuales. La ope-

* Véase la Tabla 12-1.

ración varía dependiendo de los materiales. Por ejemplo, para aceros al carbono éstos son calentados hasta aproximadamente 1 100°F y luego se dejan enfriar lentamente. Casi todos los aceros austeníticos inoxidables, se calientan aproximadamente a 2 000°F y se enfrían rápidamente a fin de prevenir la precipitación del carburo, característico en estos metales en el intervalo de 800 a 1 600°F. La precipitación del carburo en el acero inoxidable destruye su resistencia a la corrosión.

Los talleres bien equipados que se dedican a la fabricación de recipientes, disponen de hornos grandes, los cuales son calentados eléctricamente y son de suficiente volumen para recibir recipientes de cualquier tamaño que deban ser embarcados en una sola pieza. Para recipientes grandes que deben ser soldados en la obra, la relevación de esfuerzos puede hacerse empleando hornos portátiles que quemen gas. Se usan también varios procesos de relevación de esfuerzos usando temperaturas bajas. En éstos se utilizan sopletes especiales de oxiacetileno con los que se aplica calor en el área de las soldaduras seguido por una atomización de agua.

Debido a las grandes diferencias de propiedades físicas de los metales, es indispensable que un metalurgista competente indique el procedimiento adecuado para la relevación de esfuerzos.

Radiografías

Cuando se desea tener la máxima seguridad en la construcción de un recipiente, se deberán usar radiografías (rayos X) sobre las soldaduras a fin de detectar errores. Las soldaduras de buena calidad tienen eficiencias altas, y para estas condiciones los códigos[1,2] especifican valores bajos para el factor de seguridad. Es recomendable usar radiografías para los cordones de soldadura longitudinal y circunferencial de todas las juntas de los recipientes más importantes.

Fabricación en el taller y en la obra

La fabricación en la obra se reduce a un mínimo porque en el taller se dispone de mejores condiciones para trabajar y con equipo más adecuado. Sin embargo, los recipientes de diámetro grande (20 a 30 pies) deben fabricarse en la obra. Las secciones roladas (arcos) de la cubierta de 7 a 8 pies de diámetro se envían hasta el lugar de trabajo. Debe consultarse con los agentes de ferrocarril cuando se planea transportar recipientes de más de 10 pies de diámetro por 35 pies de largo. El envío de recipientes de estas dimensiones, depende principalmente de las facilidades que el ferrocarril ofrezca en cada lugar. Los recipientes de 60 a 80 pies de longitud se transportan en carros especiales, estos embarques deben planearse con cuidado.

Inspección de los recipientes

Los códigos de recipientes establecen que éstos deben ser inspeccionados por inspectores ya sean del estado, municipales o inspectores de compañías de seguros, sólo después de la inspección podrá certificarse que se ha cumplido con los códigos. Anterior a la inspección el cliente debió haber revisado el recipiente durante cada una de las fases de su construcción, lo anterior incluye la inspección de placas y cabezales a la llegada al taller, el estudio de los reportes* de las pruebas efectuadas en las plantas de laminación y las demás operaciones incluyendo la prueba de la presión hidrostática final teniendo lleno el recipiente.†

TEORIA REFERENTE AL DISEÑO DE RECIPIENTE DE PRESION

Las reglas para el diseño y fabricación de recipientes de presión a prueba de fuego, han sido especificadas por los dos mejores códigos utilizados por las industrias de procesos. Estos códigos son el de la ASME y el API-ASME para recipientes de presión a prueba de fuego.[1,2] Estos están basados en criterio de expertos. Todos los recipientes de proceso deben construirse de acuerdo con las reglas de unos de estos códigos.

Es conveniente dar un breve antecedente teórico antes de proceder a la discusión de ecuaciones para el diseño de recipientes. Las ecuaciones que se dan en los códigos para determinar el espesor mínimo de la cubierta y de los cabezales, son muy simples y de uso fácil. En ocasiones suelen olvidarse las limitaciones y fundamentos de estas ecuaciones, llegándose a un diseño pobre por el uso indebido de las mismas y por el mal uso de las llamadas gráficas para diseño rápido de recipientes.

Recipientes de pared delgada

El código de la ASME define un recipiente de pared delgada cuando el espesor del mismo es menor que la mitad del valor del radio interior.‡ Tales recipientes constituyen la mayoría de los recipientes usados en plantas de proceso, aunque para procesos como el de reactores sintéticos de amoniaco donde se requiere de presiones muy altas (10 000 a 12 000 lb/plg^2) los recipientes deben ser de paredes gruesas; en este caso no puede aplicarse la teoría referente

* Los reportes obtenidos de la planta laminadora, dan las propiedades físicas y químicas de las placas de acero que se usan en la planta para la fabricación del recipiente.

† Los recipientes son probados hidrostáticamente hasta una y media veces la presión máxima de trabajo. En esta prueba todas las juntas soldadas se someten a impacto por martilleo. El número de variantes de la prueba depende del tamaño del recipiente, del espesor, del material y de algunos otros factores similares.

‡ El código API-ASME especifica un décimo del diámetro interior.

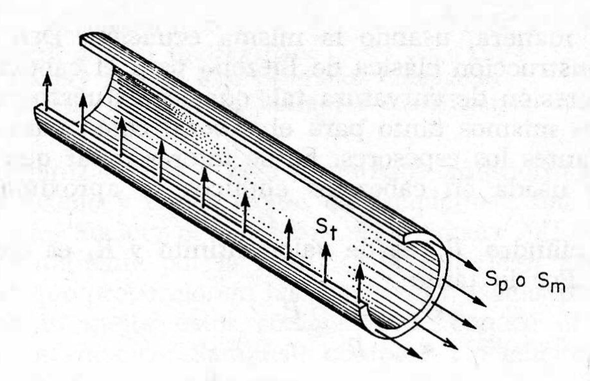


FIG. 12-5. Esfuerzos que actúan en un cilindro, originados por presión interna

a recipientes de pared delgada. En los recipientes de pared delgada los esfuerzos se suponen constantes a través del espesor de la pared. La presión que actúa dentro del cilindro produce esfuerzos longitudinal y circunferencial o tangencial, tal como se muestra en la Fig. 12-5. Estos esfuerzos se calculan a partir de las fuerzas que actúan en el recipiente. Para el caso de un cilindro simple, su derivación puede obtenerse en cualquier texto de resistencia de materiales. Den Hartog[5] dedujo una expresión de la cual pueden derivarse las ecuaciones para cualquier tipo de cubierta producida por la revolución de un elemento. Su ecuación general es la siguiente:

$$\frac{S_m}{R_m} + \frac{S_t}{R_t} = \frac{P}{t}$$

donde S_m = esfuerzo meridional, cuya dirección en caso de un cilindro es paralela al eje longitudinal del mismo.
S_t = esfuerzo tangencial, que actúa en el mismo plano que el anterior pero en dirección perpendicular.
R_t = distancia normal entre la línea de centros y un punto sobre la cubierta (el radio, para un cilindro).
R_m = radio de curvatura en el plano meridional, tiene valor infinito para un cilindro.
P = presión manométrica interior, lb/plg².
t = espesor de la cubierta.

En el caso de una esfera, R_m y R_t son iguales al radio R de la esfera y debido a la simetría S_m y S_t son iguales.

Por lo tanto,

$$\frac{S}{R} + \frac{S}{R} = \frac{P}{t}$$

o

$$S = \frac{PR}{2t} = \frac{PD_m}{4t}$$

donde D_m = diámetro medio.

De igual manera, usando la misma ecuación, Den Hartog demostró la construcción clásica de Biezeno para el cabezal de un recipiente de presión de curvatura tal, que los esfuerzos en la membrana son los mismos tanto para el cabezal como para el cilindro, siendo constantes los espesores. Es de interés notar que la relación de 2:1 muy usada en cabezales elípticos se aproxima mucho al perfil ideal.

Para un cilindro, R_m es de valor infinito y R_t es igual al radio del cilindro. Por lo tanto:

$$\frac{S_m}{\infty} + \frac{S_t}{R} = \frac{P}{t}$$

$$S_t = \frac{PR}{t} = \frac{PD_m}{2t}$$

Para el caso de un cilindro, el esfuerzo meridional es llamado longitudinal (S_p) y se obtiene considerando que la cubierta está en la dirección de la línea de centros. De la Fig. 12-5 se deduce que la fuerza que actúa en el extremo del cilindro es $\pi D_m t S_p$. Se opone esta fuerza a la originada por la presión y que actúa en la dirección longitudinal, $P\pi D_m^2/4$.

Por lo tanto,

$$\pi D_m t S_p = \frac{P\pi D_m^2}{4}$$

o

$$S_p = \frac{PD_m}{4t}$$

Por lo tanto, el esfuerzo tangencial es el de mayor valor y es el único que necesita considerarse para calcular el espesor requerido de la pared del cilindro a fin de resistir la presión interna que en el mismo cilindro actúa. Con frecuencia, al esfuerzo tangencial se le llama esfuerzo de zuncho.

Códigos

El diseño de tanques y recipientes a presión está regulado y basado en reglas publicadas en los códigos. La siguiente es una lista representativa, aun cuando no está completa de códigos y organizaciones que han formulado reglas para la construcción de recipientes y tanques.

Código API-ASME; recipientes a presión y a prueba de fuego para petróleo, líquidos y gases.

Código de la ASME para calderas, Sección VIII; reglas para construcción de recipientes a presión y a prueba de fuego.

American Petroleum Institute; especificaciones para almacenamiento de aceite, Sección No. 12-C.

Underwriters Laboratories, Inc.
National Board of Fire Underwriters.
American Factory Mutual Fire Insurance Companies.
American Bureau of Shipping Rules for Classification and Construction of Steel Vessels.

De las organizaciones y códigos citados anteriormente, los más usados para diseño y construcción de recipientes, son el publicado por la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y el publicado conjuntamente por la ASME y la American Petroleum Institute (API)* que proporcionan las reglas más usadas para el diseño. Se interpretarán mejor estos códigos si se conoce el antecedente histórico de los mismos. Samans[11] comparó las ediciones recientes de los dos códigos más utilizados.

La American Society of Mechanical Engineers, formuló entre los años de 1920-1925 el código para calderas, Sección VIII, mismo que se editó en 1925. Esta sección fue la primera edición de la ASME, *código para recipientes a presión y a prueba de fuego*. Aun cuando ésta fue la primera recopilación completa, se basó principalmente en las prácticas que existían en las industrias de calderas y generación de potencia por vapor. Aproximadamente en estas mismas fechas, la industria del petróleo empezaba su tan marcada marcha de progreso, y la industria tenía la necesidad de recipientes que pudieran resistir presiones y temperaturas altas, por lo que su uso se volvió mucho más común en la industria. Los ingenieros de la industria de refinación del petróleo consideraron inadecuado el código de la ASME de 1925, debido al intervalo tan estrecho de temperaturas especificado en él. En 1925 se presentaron estas ideas al comité de códigos y se acordó que la industria del petróleo publicara sus propias prácticas y métodos para el diseño de recipientes a presión, para beneficio tanto de la industria del petróleo, como de todas las industrias de procesos. En junta de comités de la API y la ASME, se formuló el código API-ASME cuya primera edición se elaboró en 1934, se tuvieron revisiones de la misma en los años 1936, 1938, 1943 y 1951. A partir de la edición del primer código API-ASME, el código ASME se ha revisado continuamente. En la última edición de 1952, la Sección 8 contiene reglas completas referentes al uso del hierro fundido, materiales no ferrosos y aceros de alta aleación, así como también reglas para aceros al carbono y de baja aleación, indicadas en el código API-ASME y ediciones previas del código de la ASME. Para evitar repeticiones de las regulaciones el código API-ASME, hace referencias al código ASME al referirse a las reglas para aceros de alta aleación.

No es de sorprenderse que se tengan ciertas diferencias entre los dos códigos, muchas de ellas son mínimas y pueden ser el resultado

* Al mismo tiempo que se imprimía este libro, se pensaba que el código API-ASME sería descontinuado; sin embargo, se sabe que muchas compañías lo han estado usando desde hace varios años hasta la fecha.

de la interpretación que se dé a las palabras. Quizá la variación más importante sea la definición que se refiere a los inspectores calificados. Parece ser que el código ASME es el más adecuado en cuanto a sistemas de inspección.

El código ASME actual, contiene una lista muy completa de los materiales admisibles y especifica métodos más recientes para el cálculo del espesor en recipientes sujetos a presión externa. Estas diferencias se deben a las diferencias de pensamiento o filosofía de los grupos responsables de la formulación de las reglas.

Continuamente surgen problemas referentes al diseño y fabricación de recipientes sujetos a presión, debido a dificultades que se tienen en la interpretación del código. Por esta razón el comité del código de calderas acepta preguntas referentes a la interpretación del código, y tiene reuniones mensuales para su discusión. Las decisiones tomadas en dichas juntas se envían a las personas interesadas publicándose además en el órgano oficial de la ASME, *Mechanical Engineering*. La American Petroleum Institute, también recibe consultas para la interpretación del código API-ASME.

Fórmulas de trabajo

De acuerdo a las pruebas efectuadas, las fórmulas teóricas anteriores para cilindros de pared delgada son seguras en su aplicación y son usadas por ambos códigos, el API-ASME y el ASME. El código API-ASME agrega a las juntas longitudinales un factor de tolerancia, debido a la corrosión y considera además la eficiencia. Presenta la siguiente fórmula:

$$t = \frac{PD_m}{2SE} + C \tag{1}$$

donde P = presión máxima de trabajo o de diseño, lb/plg² manométricas.

D_m = diámetro medio en pulgadas.

S = esfuerzo admisible de trabajo, lb/plg² (ambos códigos[1,2] dan el valor de S).

E = eficiencia de la junta longitudinal (los valores de la eficiencia varían de 50 a 90%, dependiendo del tipo de junta y de si se tenga relevación de esfuerzos y/o pruebas de radiografía. Véase Tabla 12-1 para valores típicos).

C = tolerancia debida a la corrosión en pulgadas.

t = espesor en pulgadas.

El utilizar el diámetro medio en lugar del diámetro interior, es con el objeto de hacer una mejor estimación del esfuerzo promedio a través de la cubierta del cilindro. Se puede deducir una ecuación

TABLA 12-1.† EFICIENCIAS ADMISIBLES EN JUNTAS SOLDADAS POR ARCO O GAS

TIPO DE JUNTA	LIMITACIONES	Eficiencia[1] de la junta básica por ciento	Radiografiada[2]	Relevada térmicamente de esfuerzos[3]	Eficiencia máxima de la junta por ciento
Junta a tope doble	Ninguna	80	... ... * *	... * ... *	80 85 90 95
Junta soldada a tope simple con placa de respaldo[4]	Juntas longitudinales no mayores de 1¼ plg de espesor. Sin limitaciones de espesor para juntas circunferenciales.				
Junta soldada a tope simple sin placa de respaldo	Sólo para juntas circunferenciales, no mayores de ⅝ plg de espesor.	70	... ...	... *	70 75
Soldadura a traslape de dos cordones	Juntas longitudinales no mayores de ⅜ plg de espesor, circunferenciales no mayores de ⅝ plg de espesor.	65	... ...	... *	65 70
Soldadura a traslape simple con soldaduras de tapón	Sólo para soldaduras circunferenciales de espesor no mayor de ⅝ plg, y para uniones a cabezales no mayores de 24 plg diá ext y cubiertas de espesor no mayor a ⅝ plg.	60	... ...	... *	60 65
Soldadura a traslape simple sin soldaduras de tapón	Para unión a cabezales convexos, para cubierta de espesor máximo ⅝ plg. Para usar con cordón de soldadura en el interior del cilindro; puede tenerse presión por arriba o por abajo del cabezal; con cordón de soldadura en el exterior si se tiene cabezal brida para cubiertas no mayores de 24 plg diá interior y espesor no mayor de ¼ plg.	50	... ...	... *	50 55

[1] Examen por puntos de todos los recipientes requeridos por Par. UW-52, excepto donde específicamente se indique.
[2] Véase Par. UW-11.
[3] Véase Par. UW-10.
[4] Puede ser considerada como equivalente a una junta a tope doble soldada, con las limitaciones descritas (véase Par. UW-35(b) y Par. UA-6).
* Indica que esas operaciones fueron ejecutadas.
† Reproducida con permiso de *Rules for Construction of Unfired Pressure Vessels*, 1952. ed., Am. Soc. Mech. Engrs. (UW se refiere a números del párrafo en el código.)

más adecuada que dé resultados en función del diámetro interior, de la Ec. 1, designando por:

$$D_m = \frac{D_1 + (D_1 + 2t)}{2} \quad \text{(donde } D_1 = \text{diámetro interior)}$$

Por lo tanto $$t = \frac{PD_1}{2SE - P} + C \quad (2)$$

El código API-ASME proporciona también la Ec. 2 y otra similar basada en el diámetro exterior. El código ASME proporciona una ecuación para calcular el espesor aumentándole al radio 0.6 veces el espesor, con lo cual se obtiene un esfuerzo promedio más aproximado, la ecuación resultante es:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (3)$$

donde R = radio interior en pulgadas.

Al comparar esta ecuación con la 2 se tendrá una pequeña diferencia si R se cambia por D_1 y se multiplica por 2 el denominador y numerador.

Análogamente, se pueden hacer comparaciones entre las ecuaciones teóricas básicas y las ecuaciones de trabajo proporcionadas en los códigos para cada una de las formas de recipientes. Resulta de mucha utilidad para el ingeniero de proyecto, familiarizarse con los antecedentes de las fórmulas más comúnmente usadas dadas en los códigos, de esta manera se podrán entender claramente las limitaciones de las mismas. Debe entenderse que las fórmulas empleadas para el cálculo del espesor de una cubierta, se refieren a cilindros sujetos a presión interna, debiendo considerarse por separado cargas tales como: Cargas muertas (debido al peso del recipiente y contenido), cargas de viento, esfuerzos por temperatura y otras cargas que pudieran tenerse. Con frecuencia, el espesor de la cubierta en la parte inferior de una torre alta es definido por la carga de viento y por el peso propio de la torre.

En la Tabla 12-2 se da un resumen de las ecuaciones comúnmente usadas en el diseño de recipientes. Se recomienda tener cuidado usando adecuadamente estas fórmulas. En tanto no se conozcan las bases y las limitaciones de estas ecuaciones, será conveniente hacer referencia a las fuentes originales.

Las fórmulas empleadas para recipientes de pared delgada, están basadas considerando que el esfuerzo circunferencial se distribuye uniformemente a través de la pared del cilindro. Esta consideración no es correcta para recipientes de pared gruesa. Para el diseño de cilindros de pared gruesa se usan otras ecuaciones. Perry[10] hizo una recopilación de las mismas. No es correcto hacer cálculos aproxi-

TABLA 12-2. RESUMEN DE FORMULAS EMPLEADAS EN EL DISEÑO DE RECIPIENTES DE PARED DELGADA (PRESION INTERNA)

Propósito	ASME	API-ASME
1. Espesor de la cubierta (presión interna)		
(*a*) Cilíndrica	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + C$	$t = \frac{PD_1}{2SE - P} + C$
(*b*) Esférica	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} + C$	$t = \frac{PD_1}{4SE - P} + C$
2. Cabezales		
(*a*) Elipsoidal (2:1)	$t = \frac{PD_1}{2SE - 0.2P} + C$	$t = \frac{PD_m}{2SE} + C$
(*b*) Cóncavo (ASME estándar con radio de rótula, 6% de comba)	$t = \frac{0.885PR_c}{SE - 0.1P} + C$	$t = \frac{0.885PR_c}{SE} + C$
(*c*) Hemisférico	$t = \frac{PD_1}{4SE - 0.4P} + C$	$t = \frac{PD_m}{4SE} + C$
(*d*) Cónico	$t = \frac{PD_{ci}}{2\cos\alpha(SE - 0.6P)} + C$	$t = \frac{PD_c}{2SE\cos\alpha} + C$
3. Espesor de cubiertas cilíndricas basado en cargas combinadas		
(*a*) Combinación de carga muerta, presión interna y cargas de viento	Lado de barlovento $t = \frac{2P_{wh}^2}{\pi D'S} - \frac{W}{\pi D_m S} + \frac{PD_m}{4S}$ Lado de sotavento $t = \frac{2P_{wh}^2}{\pi D'S} + \frac{W}{\pi D_m S} - \frac{PD_m}{4S}$	
4. Pandeo	$t = \frac{2P_{wh}^2}{\pi D'S_B} + \frac{W}{\pi D_m S_B}$	

Nomenclatura

C = tolerancia por corrosión, plg

D = diámetro exterior de la cubierta, plg

D' = diámetro exterior de la cubierta incluyendo aislamiento, plg

D_1 = diámetro interior de la cubierta, plg

D_c = diámetro medio de un cono en el punto considerado, plg

D_{ci} = diámetro interior de un cono en el punto considerado, plg

D_m = diámetro medio de la cubierta, plg

E = eficiencia de la junta, como fracción (véanse códigos)
h = distancia desde la parte superior del recipiente al punto considerado, pies
I = momento de inercia, $(plg)^4$
M = momento flexionante debido al viento, lb-pies
P = presión manométrica de trabajo, lb/plg²
P_w = presión manométrica debida al viento, lb-pie²
R = radio interior de la cubierta, plg
R_c = radio hasta la concavidad del cabezal, medido desde la línea de centros hasta la placa combada, plg
S = esfuerzo admisible de trabajo (véanse tablas del código), lb/plg²
S_B = esfuerzo admisible por pandeo, $2 \times 10^6(t/D)$, lb/plg²
S_0 = esfuerzo debido a cargas muertas, lb/plg²
S_p = esfuerzo longitudinal, lb/plg²
S_w = esfuerzo debido al viento, lb/plg²
t = espesor de la cubierta o del cabezal, plg
W = peso del recipiente, lb
α = mitad del ángulo comprendido entre el cono y la base

mados usando las ecuaciones de cilindros de pared delgada para cálculo de cilindros de pared gruesa, pues se incurriría en errores de consideración. Varias compañías químicas importantes, han hecho estudios experimentales en depósitos de pared gruesa sujetos a altas presiones interiores. Como resultado de estos estudios se tienen nuevas ecuaciones. Actualmente es recomendable usar factores de seguridad apropiados debido a la escasez de conocimientos que se tienen en el diseño de recipiente de pared gruesa.

En ambos códigos se presenta, en forma de gráficas, el cálculo del espesor de cubiertas sujetas a presión externa (recipientes al vacío). También se proporcionan diseños detallados y aplicaciones referentes a anillos de atiesamiento.

Esfuerzos en la cubierta, debido a cargas muertas y de viento

Los códigos estipulan que para el diseño de recipientes sujetos a presión interna, deben también considerarse los esfuerzos producidos por las cargas de viento y por cargas muertas debido al peso del recipiente y al líquido contenido en éste, pero no especifican las reglas correspondientes.

En el lado de barlovento de un recipiente, los esfuerzos debidos al viento y a la presión interna (en este caso, esfuerzos longitudinales) producen esfuerzos de tensión en la pared del recipiente, mientras que las cargas muertas producen esfuerzos de compresión. En el lado de sotavento, las cargas muertas y de viento producen esfuerzos de compresión, mientras que el esfuerzo longitudinal debido a la presión interna es de tensión. Estas dos condiciones pueden expresarse matemáticamente de la siguiente manera: *

* El análisis anterior está basado en la teoría del esfuerzo máximo que es la más simple y la más comúnmente usada. Algunas otras teorías son, la de deformación máxima, corte máximo y energía de deformación. Brummerstedt[3] hizo una recopilación de dichas teorías.

Barlovento: $S = S_w - S_0 + S_p$ (4)

Sotavento: $S = S_w + S_0 - S_p$ (5)

donde S = esfuerzo admisible
S_w = esfuerzo debido a la carga de viento
S_0 = esfuerzo debido a la carga muerta
S_p = esfuerzo longitudinal, $PD_m/4t$

Para efecto de estimaciones, el esfuerzo admisible de las fórmulas anteriores es el que resulta de multiplicar el esfuerzo de trabajo indicado en los códigos según el material a usar por la eficiencia de la junta.

Además de las condiciones estipuladas, las cargas muertas y de viento pueden producir pandeo en el lado de sotavento del recipiente cilíndrico. Para estar dentro de la seguridad, se aconseja suponer para efectos de cálculo, que la presión interna sea cero, ya que ésta aumenta la estabilidad del recipiente. El esfuerzo admisible por pandeo es igual al esfuerzo debido a la carga de viento más el debido a la carga muerta ($S_B = S_w + S_0$), L. H. Donnell[6] ha realizado bastante trabajo experimental en pandeo de recipientes y desarrolló la siguiente ecuación empírica para determinar el esfuerzo admisible.

$$S_B = E\left[\frac{0.6(t/R) - 10^{-7}(R/t)}{1 + 0.004\,(E/S_y)}\right] \tag{6}$$

donde t = espesor de la cubierta
R = radio de la cubierta
E = módulo de elasticidad
S_y = esfuerzo en el punto cedente

Jorgensen[7] simplificó esta fórmula para cubiertas de acero al carbono y llegó a la expresión $B_B = 2 \times 10^6(t/D)$, utilizando para ello un factor de seguridad de 4 en los esfuerzos calculados en la fórmula de Donnell.

Las fórmulas de los esfuerzos admisibles, pueden expandirse como sigue:

$$\text{Carga de viento} = S_w = \frac{MD'12}{2I}$$

(basada en la conocida fórmula del esfuerzo flexionante, momento flexionante/módulo de sección)

donde M = momento flexionante
$= (1/2)P_w \times (D'/12)h^2$ lb-pies

P_w = presión unitaria del viento,* lb/pie^2
D' = diámetro exterior de la cubierta en plg, incluye aislamiento y/u otras protecciones
h = distancia desde la parte superior del depósito hasta el punto considerado, pies
I = momento de inercia
= aproximadamente $\pi(D')^3t/8$, (plg)^4
t = espesor de la cubierta, plg

Por lo tanto,

$$S_w = \frac{MD'(12)(8)}{(2)\pi(D')^3t} = \frac{48M}{\pi(D')^2t}$$

$$= \frac{48\,P_wD'h^2}{24\pi(D')^2t} = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} \quad (7)$$

Carga muerta:

$$S_0 = \frac{W}{\pi D_mt}$$

donde W = peso del recipiente más interiores y líquido
D_m = diámetro medio de la cubierta en plg.

Por lo tanto, sustituyendo en las Ecs. 4 y 5:

esfuerzo admisible, lado barlovento $= S = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} - \frac{W}{\pi D_mt} + \frac{PD_m}{4t}$

o

$$t = \frac{2P_wh^2}{\pi D'S} - \frac{W}{\pi D_mS} + \frac{PD_m}{4S} \quad (8)$$

esfuerzo admisible, lado sotavento $= S = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} + \frac{W}{\pi D_mt} - \frac{PD_m}{4t}$

o

$$t = \frac{2P_wh^2}{\pi D'S} + \frac{W}{\pi D_mS} - \frac{PD_m}{4S} \quad (9)$$

Esfuerzo por pandeo $= S_B = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} + \frac{W}{\pi D_mt}$

o

$$t = \frac{2P_wh^2}{\pi D'S_B} + \frac{W}{\pi D_mS_B} \quad (10)$$

Las tres fórmulas anteriores junto con la del esfuerzo circunferencial se utilizan para determinar el espesor del cilindro. Debe suponerse primero un peso del recipiente, ya que el peso de éste dependerá del espesor finalmente escogido. Se conocen varias fórmulas para estimarlo. Jorgensen[7] desarrolló la fórmula $W = 15.6Dht + 0.163hD^2$ para torres sin aislamiento y con bandejas de hierro fundido. Nelson[9] sugiere se calcule el peso basado en el espesor t y en

* La presión unitaria del viento, está relacionada con la velocidad del viento y se calcula por una fórmula empírica desarrollada por la U.S. Weather Bureau. Viento con velocidad de 100 mph es aproximadamente equivalente a 30 lb/pie^2; viento a 125 mph, a 40 lb/pie^2.

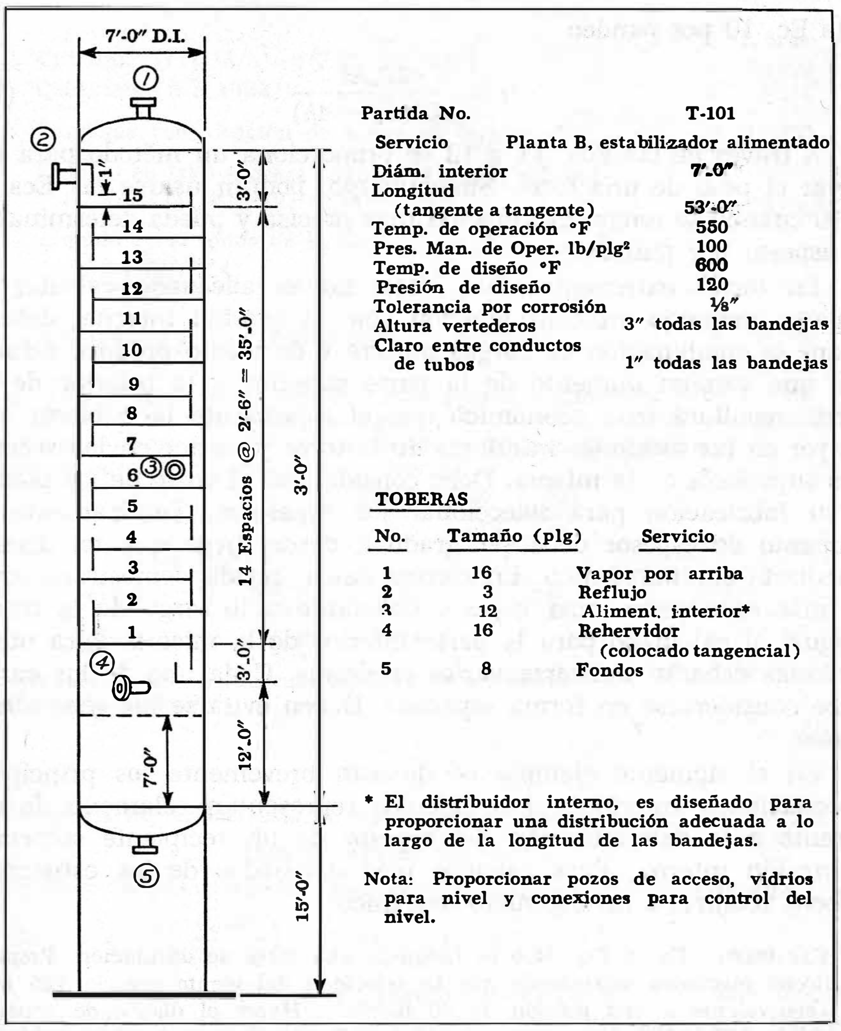


FIG. 12-6. Esquema de un proceso de recipiente

la altura h, considerando que el peso específico del metal tiene por valor 0.283 lb/plg³, e incrementar este valor en un 18% para tomar en cuenta el líquido, aislamiento, bandejas, etc. Empleando este procedimiento la Ec. 8 resulta hacia el lado de barlovento

$$t = \frac{2P_w h^2/\pi D' + PD_m/4}{S + 4h} \tag{11}$$

la Ec. 9 para el lado de sotavento

$$t = \frac{2P_w h^2/\pi D' - PD_m/4}{S - 4h} \tag{12}$$

y la Ec. 10 por pandeo

$$t = \frac{2P_w h^2}{\pi D'(S_B - 4h)} \tag{13}$$

A través de las Ecs. 11 a 13 se proporciona un método para estimar el peso de una torre. Sin embargo, podrán usarse las Ecs. 8 a 10 cuando se tenga información más precisa y pueda determinarse el espesor por tanteos.

En torres extremadamente altas, no es adecuado calcular el espesor tomando en consideración sólo la presión interna, debido a que la combinación de cargas muerta y de viento produce esfuerzos que van en aumento de la parte superior a la inferior de la torre, resultará más económico que el espesor de la cubierta sea mayor en las secciones inferiores de la torre y menor en las secciones superiores de la misma. Debe considerarse el costo de las placas y su fabricación para seleccionar los espesores. Teóricamente el aumento de espesor debe ser gradual, desde luego que tal diseño resultaría ser impráctico. En ciertos casos, puede demostrarse que es más económico tener espesor constante a lo largo de la torre, e igual al calculado para la parte inferior de la misma. Para otros sistemas deberán indicarse varios espesores. Cada uno de los casos debe considerarse en forma separada. Deben evitarse las generalizaciones.

En el siguiente ejemplo se ilustran brevemente los principios y ecuaciones anteriores. Los cálculos representan solamente lo referente a la determinación del espesor de un recipiente sometido a presión interna. Para cálculos más detallados de los esfuerzos, deberá acudirse a un ingeniero mecánico.

EJEMPLO: En la Fig. 12-6 se bosqueja una torre de destilación. Prepare el diseño mecánico suponiendo que la velocidad del viento sea de 125 mi/hr (equivalente a una presión de 40 lb/pie²). Hacer el diseño de acuerdo al código API-ASME. Usar acero ASTM A-70 grado Firebox y juntas soldadas a tope doble. No se necesita de relevación de esfuerzos ni prueba de rayos X.

ESPESOR NECESARIO DE LA CUBIERTA CONSIDERANDO LA PRESION INTERNA

$$t = \frac{PD_1}{2SE - P} + C$$

del código API-ASME: $E = 0.80$
$S = 13\,750$

$$t = \frac{(120)(7)(12)}{(2)(13\,750)(0.80) - 120} + 0.125 = 0.46 + 0.125 = 0.585 \text{ plg}$$

espesor práctico más próximo = ⅝ plg.

CONSIDERANDO LOS ESFUERZOS EN LA LÍNEA TANGENTE PARTE INFERIOR DEL RECIPIENTE

Peso estimado en operación (sin incluir faldones) $D_m = 7.05$ pies

		Libras
Cilindro: (1/12)(5/8)(π)(7.05)(53)(489)	=	30 000
Cabezales (2 a 1622)	=	3 244
Bandejas (de aleación de acero 26 lb/pie²) $\frac{(\pi)(7)^2(26)}{4}$	=	15 000
Líquido en las bandejas (agua a 3 plg de altura) (15)[(π)(7)²/4](3/12)(62.4)	=	9 000
Líquido en el fondo de la torre (7 pies) $\frac{(7)(\pi)(7)^2(62.4)}{4} + (44.8)^*(624)$	=	19 650
Aislamiento (3 plg aislamiento de plástico)	=	8 600
		85 494 lb
Peso del agua, lleno completo para prueba hidrostática	=	133 000
Peso del recipiente lleno de agua	=	189 844†

Espesor basado de los esfuerzos en el fondo del recipiente, correspondientes al lado de barlovento.

$$S = (13\,750)(0.8) = 11\,000 = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} - \frac{W}{\pi Dt} + \frac{PD}{4t}$$

$$t = \frac{(2)(40)(53)^2}{(\pi)(7.5)(12)(11\,000)} - \frac{85\,494}{(\pi)(7.05)(12)(11\,000)} + \frac{(120)(7.05)(12)}{(4)(11\,000)}$$

$$= 0.072 - 0.0292 + 0.232 = 0.2748 \text{ plg}$$

Espesor basado en los esfuerzos correspondientes al lado de sotavento

$$S = \frac{2P_wh^2}{\pi D't} + \frac{W}{\pi D_mt} - \frac{PD_m}{4S}$$

Por simple inspección, éste no resulta ser el espesor crítico.

Espesor basado en pandeo

Considerar el peso total del agua como la condición más desfavorable.

$$S_B = 2 \times 16^6 \left(\frac{0.500}{(7)(12)}\right) = 11\,900 \text{ o } (11\,900)(0.8)$$

$$= 9\,500 \text{ aprox. (Basado en espesor corroído, } 0.625 - 0.125 = 0.500)$$

$$t = \frac{2P_wh^2}{\pi D'S_B} + \frac{W}{\pi D_mS_B}$$

$$t = \frac{(2)(40)(53)^2}{\pi(7.5)(12)(9500)} + \frac{189.844}{(\pi)(7.05)(12)(9500)} = 0.14 \text{ plg}$$

Todos los valores anteriores basados en la presión circunferencial, resultaron menores que el espesor no corroído; por lo tanto, el valor del espesor necesario es el obtenido basado en la presión circunferencial.

Condiciones de diseño

En las tablas de los códigos se proporcionan los esfuerzos de trabajo admisibles que se usan en diferentes fórmulas. Se obtienen

* Volumen de 7'-0" DI 2:1 cabezal elíptico.

† 85 494 − 9 000 − 19 650 + 133 000 = 189 844.

dividiendo el esfuerzo de cedencia por un factor de seguridad apropiado. El código ASME fija en 5 el valor de este factor para temperaturas hasta de 650°F y el código API-ASME fija un valor de 4. Los esfuerzos de trabajo admisibles se seleccionan de tablas elaboradas de acuerdo a la temperatura. El diseñador del recipiente junto con el ingeniero de proyecto o proceso, selecciona la presión máxima de trabajo o presión de diseño y la temperatura de diseño que deben tenerse en el recipiente. Tal como se especifica en los códigos, la presión de diseño deberá ser menor que la presión máxima a que trabajan las válvulas de desahogo. Se acostumbra usar una presión de diseño aproximadamente 20% mayor que la presión máxima de operación. En algunas operaciones poco comunes, podrán requerirse presiones de diseño de valor elevado. De igual manera, la temperatura de diseño podrá escogerse de un valor mayor que la temperatura normal de operación, por ejemplo, en 50°. Se pueden tener márgenes altos de seguridad en procesos donde la temperatura se incrementa grandemente. Debe recordarse que no se puede considerar cada posible contingencia, ya que ello elevaría considerablemente los costos. Por lo tanto, los recipientes deben ser diseñados para resistir todas las posibles contingencias razonables, debiendo instalarse aparatos para desahogo de presión, con objeto de proteger al recipiente y personal en caso de ocurrir situaciones inesperadas.

DESARROLLO DEL DISEÑO DE UN RECIPIENTE

Estimación de las dimensiones fundamentales

El ingeniero de proceso determinará el tamaño y la forma del recipiente, por el entrenamiento y su experiencia, él es la persona más adecuada para hacer tales decisiones. El diámetro y la altura de la torre de destilación se fijan dentro de ciertos límites, de acuerdo a cálculos del sistema de destilación. De acuerdo con estos cálculos, se determinará el volumen de los tambores de acumulación, reactores y tanques. Quien realiza estos cálculos, se da cuenta de todas las posibilidades que tiene para hacer la elección. Por ejemplo, para un tanque acumulador que debe tener un cierto volumen, existe un número infinito de selecciones de longitud a diámetro para satisfacer dicho volumen. Un factor necesario a considerar, es el que produzca el diseño más económico. Brummerstedt[4] demostró que la relación de 3:1 o 4:1 es la más económica para tanques de baja presión, en el intervalo de 50 a 75 lb/plg² manométricas, es la dada por las relaciones longitud a diámetro de 4:1 a 6:1. Y que para presiones manométricas arriba de 100 lb/plg² la relación preferible es la de 6:1. Otros factores que deben considerarse son disposición del equipo, apariencia y cimentaciones. El ingeniero

de proceso debe especificar los recipientes de modo que puedan emplearse materiales estándar en su totalidad. El uso de cabezales estándar evitará el costo extra de arreglos especiales.

Durante el periodo de planeación, el ingeniero de proceso junto con el diseñador del recipiente, planearán el diseño más económico del recipiente. Los ingenieros encargados del diseño mecánico y de la fabricación, no deberán hacer cambios en las dimensiones básicas por ser éstas las necesarias en el proceso. Es necesario escoger adecuadamente, las dimensiones básicas para que satisfaga al proceso y para que resulte un diseño de lo más económico.

Materiales de construcción

La selección de los materiales para la construcción del recipiente, deberá hacerse conjuntamente por el diseñador del recipiente, el ingeniero de proyecto y el ingeniero de proceso. Los metales que se escojan deben resistir los efectos de corrosión y erosión, y deben tener suficiente resistencia para poder soportar la temperatura y presión de diseño, y además que conduzcan a un diseño práctico. Una selección inteligente de materiales, asegurará bajos costos de mantenimiento y bajos costos iniciales.

Sería incompleto cualquier intento que se hiciera para elaborar una lista de selección de materiales. En particular la selección de materiales resistentes a la corrosión, es una ciencia empírica que depende de las condiciones exactas de uso, incluyendo la presencia de trazos de impurezas en el ambiente que rodea al metal. Los ingenieros deben usar con cuidado las gráficas para la selección de materiales. Las únicas guías de seguridad son los resultados experimentales, las experiencias obtenidas en plantas para condiciones similares, o la opinión de expertos en corrosión.

Comunicación de las especificaciones de un proceso

La manera más eficiente de comunicar las especificaciones de un proceso, en lo que a tanques y recipientes se refiere, es mediante croquis o dibujos. El ingeniero de proceso puede hacer un simple bosquejo del recipiente en el que se indiquen las condiciones de operación, el número y tamaño de toberas, y necesidades interiores requeridas (Fig. 12-6). También recomendará los materiales de construcción (particularmente en el caso de manejar fluidos corrosivos) y el espesor del aislamiento. Discutirá con el diseñador del recipiente en caso de requerimientos imprevistos. Esto incluye la tolerancia por corrosión que deba usarse para determinar el espesor del recipiente.

Diseño de los detalles mecánicos

Una vez recibidos los esquemas del proceso, el diseñador del recipiente puede proceder al diseño de los detalles mecánicos del re-

cipiente. Invariablemente, el diseño se basará en uno de los códigos (API-ASME o ASME), generalmente la selección del código lo hace el personal de la industria a la que se le construye el recipiente. En caso de no haber preferencias por parte de la industria, la selección la hará el diseñador del recipiente. En muchas ciudades y estados se tienen códigos o necesidades especiales que satisfacer, aunque muchas de éstas están basadas directamente en los códigos API-ASME o ASME. Un resumen de estas necesidades para los Estados Unidos y Canadá está contenida en *Synopsis of Boiler Codes, Rules and Regulations by States, Provinces, and Cities,* de la National Bureau of Casualty and Surety Underwriters.[15] Desde luego que no hay impedimentos para efectuar diseños en forma sobrada con respecto a lo indicado en los códigos y, en muchos casos, el cliente o el diseñador eligen ciertas reglas a fin de lograr un mejor diseño. En estos casos, el diseñador incluye las especificaciones con las referencias de los códigos usados y las necesidades adicionales deseadas.

Después de haber completado el diseño mecánico inicial, el cual incluye los cálculos del espesor de la cubierta y cabezales, se hace un croquis preliminar del recipiente mostrando los detalles principales que incluyen tamaño y número de toberas, sin indicar la orientación de las mismas. Este bosquejo inicial puede hacerse en tal forma, que después de efectuadas las revisiones subsecuentes, pueda utilizarse para hacer el dibujo final y completo del recipiente, también puede hacerse este dibujo en hojas de tamaño pequeño como dibujo de trabajo. En cualquier forma que se proceda esto constituye un excelente medio de comunicación para transmitir información preliminar a los fabricantes de recipientes o bien para obtener las cotizaciones correspondientes. Debido a que algunas placas y materiales tardan mucho tiempo para su entrega, resulta muy conveniente, ordenar lo antes posible la fabricación del recipiente y no esperar hasta que se produzca el diseño final. Después que se ha dado la orden de fabricación, el fabricante del recipiente debe proceder a la compra de los materiales principales, tales como placas para la cubierta y cabezales.

El diseño de la planta avanza simultáneamente con el desarrollo del diseño del recipiente así como con los dibujos de tuberías y con la orientación de toberas y agujeros —hombre, también con la localización de las partes interiores del recipiente. Se completa el dibujo del recipiente después de haber sido revisado por los que diseñan la tubería para verificar orientaciones y posibles interferencias, por quienes diseñan las estructuras para la localización de soportes, por el ingeniero de proceso para verificar las necesidades del proceso y por el ingeniero de proyecto para verificar necesidades y economías en el costo.

SIMBOLOS BASICOS PARA SOLDADURA DE GAS Y ARCO							
TIPO DE SOLDADURA							
CORDON	FILETE	TAPON O RANURA	RANURA				
			ESCUADRA	V	BISEL	U	J

SIMBOLOS DE SOLDADURA DE RESISTENCIA				SIMBOLOS SUPLEMENTARIOS			
TIPO DE SOLDADURA							
PUNTO	PROYECCION	COSTURA	A TOPE RECALCADA	SOLDAR TODO ALREDEDOR	SOLDAR EN LA OBRA	CONTORNO	
						A PAÑO	CONVEXO

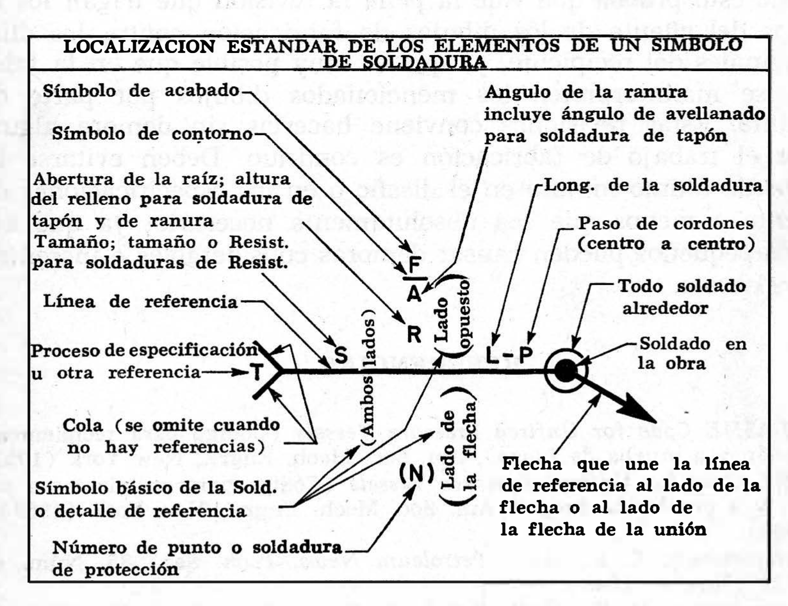


FIG. 12-8. Símbolos de soldadura estándar. (Redibujados con permiso de *Welding Handbook*, American Welding Society)

Los dibujos del recipiente pasan por un gran número de ingenieros para revisiones y comentarios. Es muy importante que el ingeniero que revisa los dibujos, lo haga solamente en los puntos para lo cual él está entrenado y capacitado. Al ingeniero de proyecto le llevaría mucho tiempo la revisión del diseño mecánico del recipiente.

En la Fig. 12-7 (frente a Pág. 224) se tiene un ejemplo del dibujo de un recipiente. Es de notarse la importancia de la información dada en el dibujo, tal como condiciones de diseño, condiciones de operación, código y especificaciones del material. Debe incluirse el peso del recipiente cuando está lleno y vacío, pues esto ayuda en su trabajo a las personas encargadas del diseño de las estructuras y cimentaciones. Muchas compañías han encontrado ventajas al usar elementos estándar tales como portezuelas y placas para las bases de las torres. No es necesario repetir los detalles de estos elementos en cada dibujo, en su lugar se incluyen dibujos impresos estándar de estos elementos en los dibujos del recipiente.

De los dibujos del recipiente que el fabricante recibe del departamento de ingeniería del comprador, se preparan los dibujos de taller que son dibujos de trabajo para ser usados por los soldadores, paileros y mecánicos. En la Fig. 12-8, se muestra una parte de los símbolos estándar de soldadura usados por los soldadores, los cuales sirven como una guía para sus trabajos.

Todo esto prueba que vale la pena la revisión que hagan los ingenieros del cliente de los dibujos de fabricación contra los dibujos originales del recipiente, ya que es muy posible que en la fabricación se malinterpreten los mencionados dibujos por parte del fabricante. Estas revisiones conviene hacerlas sin demora alguna ya que el trabajo de fabricación es continuo. Deben evitarse los cambios de último minuto en el diseño o en las especificaciones del recipiente a menos que sea absolutamente necesario; ya que aun cambios pequeños pueden causar demoras considerables e incrementos en el costo.

REFERENCIAS

1. *API-ASME Code for Unfired Pressure Vessels* (Código para recipientes a presión y a prueba de fuego), Am. Soc. Mech. Engrs., New York (1951).
2. *ASME Code for Unfired Pressure Vessels* (Código para recipientes a presión y a prueba de fuego), Am. Soc. Mech. Engrs., New York (1952) y (1956).
3. Brummerstedt, E. F., *Nat'l. Petroleum News, Tech. Sec.*, 35, Núm. 44, R-539 (Nov. 3, 1943).
4. Brummerstedt, E. F., *Nat'l. Petroleum News, Tech. Sec.*, 36, Núm. 18, R-282 (mayo 3, 1944).
5. Den Hartog, J. P., *Advanced Strength of Materials*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.
6. Donnell, L. H., *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 56, 795 (1934).
7. Jorgensen, S. M., *Petroleum Refiner*, 24, 381 (1945).
8. Marin, Joseph, *Strength of Materials*, Macmillan Co., New York, 1948.
9. Nelson, J. G., *Petroleum Refiner*, 27, 565 (1948).
10. Perry, John H., *Chemical Engineer's Handbook*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., 1950.

11. Samans, Walter, *Alco Products Review*, 2, Núm. 2, 17 (1953) American Locomotive Co., New York.
12. Siemon, Karl, *Manual for the Design of Ferrous and Non-Ferrous Pressure Vessel and Tanks*, 4a. Ed., Edwards Brothers, Inc., Ann Arbor, Michigan, 1952.
13. Spring, H. M., Jr., *Pressure Vessels for Industry*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1947.
14. *Steel Plates and Their Fabrication*, Lukens-Steel Co., Coatesville, Pa. (1947).
15. *Synopsis of Boiler Laws, Rules, and Regulations by States, Provinces, and Cities (E.U.A. y Canadá)*, Nat'l. Bureau of Casualty and Surety Underwriters. Boiler and Machinery Division, 60 John St., New York.
16. Timoshenko, S., *Strength of Materials*, Parte II, Van Nostrand Co., Inc., New York, 1941.
17. Timoshenko, S., *Theory of Elastic Stability*, 439-497, McGraw-Hill Book Co., New York, 1936.

CAPITULO 13

CAMBIADORES DE CALOR

Los procesos químicos invariablemente requieren de la adición o eliminación de calor. Por consiguiente, el diseño y aplicación cuidadosos de los cambiadores de calor han sido objeto de una consideración importante en el diseño de plantas.

El diseño completo de los cambiadores de calor rara vez constituye una tarea del ingeniero de proceso o del ingeniero de proyecto. Por lo general dicho equipo se compra al fabricante de cambiadores de calor, quien lo diseña y lo garantiza. No obstante, el ingeniero de proyecto debe entender los métodos de diseño y fabricación de cambiadores de calor. El conocimiento de estas técnicas permite una estrecha cooperación entre el ingeniero de proyecto y los representantes del fabricante, cooperación que puede ahorrar tiempo y dinero.

TIPOS DE CAMBIADORES DE CALOR

Se fabrican tipos muy diversos de cambiadores de calor. Más adelante se discutirán algunas de las variedades más extensamente usadas. Siempre pueden proyectarse diseños especiales, los cuales pueden ser ventajosos para una aplicación en particular. Sin embargo, siempre que se pueda es preferible utilizar los diseños estándares o equipos "de línea". Los fabricantes de cambiadores están capacitados para producir, sobre la base de producción en serie, ciertos tipos y tamaños de cambiadores de calor. Cualquier desviación importante de estos diseños de línea requerirá operaciones especiales y, por lo tanto, aumento de costo.

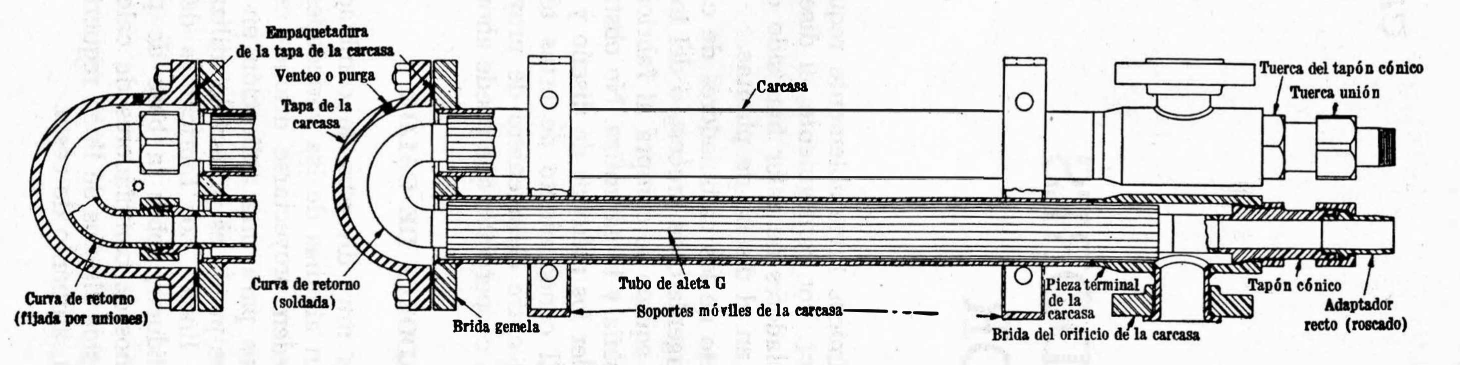


FIG. 13-1. Cambiador de doble tubo, de superficie aumentada; aleta G. (Cortesía de Griscom-Russell Company.)

Cambiador de calor de doble tubo

Como su nombre lo dice, el cambiador de calor de doble tubo consiste de dos tubos concéntricos. Un fluido circula en el tubo interior y otro en la sección anular delimitada entre los tubos interior y exterior. Estos cambiadores se disponen más convenientemente en forma de horquilla, similar al cambiador de superficie aumentada que se muestra en la Fig. 13-1. La longitud práctica habitual de estas horquillas es de veinte pies (7.10 m). Dichos cambiadores se construyen de manera muy fácil en prácticamente cualquier taller y continúan resultando de suma utilidad en donde existen requerimientos muy pequeños de superficies [aproximadamente 100 $pies^2$ (9.30 m^2)].

Cambiadores de calor de doble tubo, de superficie aumentada

Una de las ventajas del cambiador de doble tubo es su bajo costo. El deseo de obtener los beneficios de su bajo costo y al mismo tiempo disfrutar las ventajas de mayores superficies, aceleró el desarrollo del tubo de superficie aumentada. En la Fig. 13-2 se muestran ejemplos típicos de tales tubos. En el diseño de cambiador de doble tubo (Fig. 13-1) se usa con mayor frecuencia la aleta longitudinal. Las aletas transversales se emplean principalmente para arreglos de flujo transversal, bien sea en cambiadores de tubo y carcasa, de superficie aumentada, o bien en los cambiadores enfriados por aire cuya popularidad está aumentando en lugares en donde la escasez de agua es un problema. El uso de tubos de aleta es particularmente deseable para gases, líquidos viscosos, o corrientes de pequeño flujo. Estos fluidos producen altas resistencias al flujo de calor, las cuales son parcialmente vencidas por la mayor área efectiva introducida por las aletas. Para requerimientos superficiales inferiores a 1 000 $pies^2$, el uso de cambiadores de doble tubo, de superficie aumentada, con frecuencia produce un ahorro considerable. A las unidades con superficies inferiores a 500 $pies^2$ se les debe dar una consideración particular. Las secciones de doble tubo pueden estar dispuestas en hileras y conectadas en serie (Fig. 13-3).

Cambiadores de calor de carcasa y tubos

El tipo más ampliamente usado de cambiador de calor es el de carcasa y tubos. Conforme los requerimientos de superficie de intercambio de calor se vuelven grandes, los diseños de cambiadores de doble tubo demandan excesivo espacio. El diseño de carcasa y tubos, no obstante, proporciona una gran área superficial por volumen unitario de espacio ocupado. Aunque difiriendo en ciertos detalles de diseño, todos los fabricantes de cambiadores construyen diversos tipos estándares de cambiadores de calor de carcasa y tubos. Aproxi-

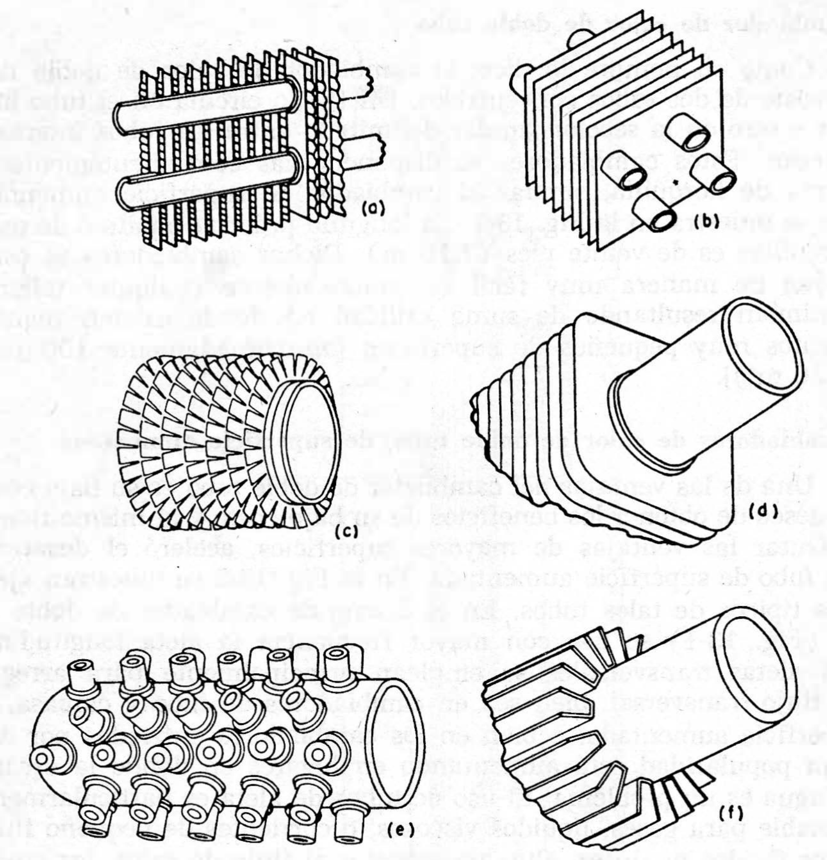


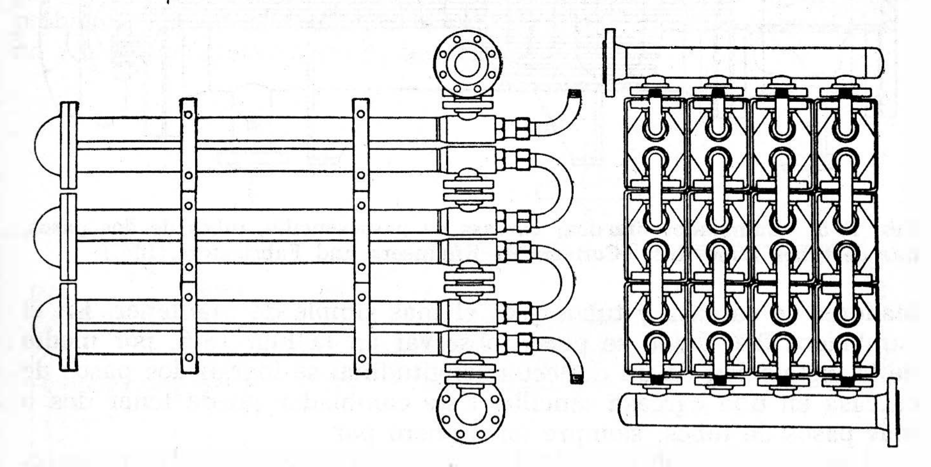
FIG. 13-2. Tubos típicos con superficie aumentada: (*a*), (*b*), (*c*) y (*d*), aletas transversales; (*e*) aletas de espiga; (*f*) aletas longitudinales. (Reimpresa con autorización, E. J. Skiba, *Chem. Eng.*, *61*, Núm. 12, 182 (1954) y Brown Fintube Company.)

madamente el noventa por ciento de todos los trabajos de intercambio de calor pueden ser efectuados mediante uno u otro de los diseños básicos.

Cambiador 1-1 a contracorriente

El intercambio más eficiente de calor puede ser logrado por medio de un arreglo a contracorriente en el cual uno de los fluidos circula en dirección opuesta del otro. En equipos de carcasa y tubos, esto se lleva a cabo, de manera bastante aproximada, en el llamado "cambiador 1-1", el cual consiste en un paso de carcasa y un paso de tubos (Fig. 13-4). Si un cambiador 1-1 se suministra con un cabezal flotante en el haz de tubos (Fig. 13-9), el orificio de salida en el lado del cabezal flotante debe pasar a través de un prensaestopas, ya que

debe tener libertad para moverse con el cabezal flotante. El cambiador 1-1 se emplea cuando las pérdidas por fricción en el lado de los tubos deben ser mantenidas al mínimo y cuando los requerimientos de temperatura son tales que se debe usar un verdadero flujo a contracorriente.



Arreglo de cuatro bancos paralelos de tres secciones conectadas en serie. Para conectar los elementos de cada banco en serie, se usan conectores de tubo, con adaptadores de 90°, roscados, para las conexiones de entrada y salida del tubo. Los cuatro bancos en paralelo están conectados por medio de múltiples a la entrada y a la salida de la carcasa.

FIG. 13-3. Arreglo típico de secciones de cambiador de doble tubo: Aleta G. (Cortesía de Griscom-Russel Company.)

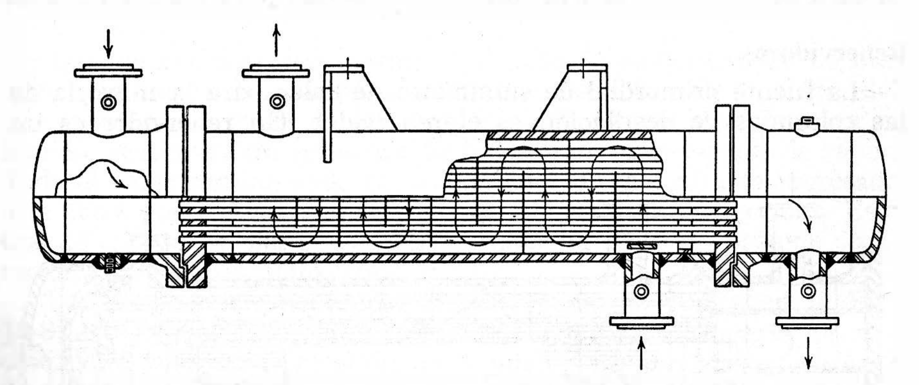


FIG. 13-4. Cambiador uno-uno: carcasa de paso sencillo, tubos de paso sencillo, placa tubular fija. (Cortesía de Engineers and Fabricators, Inc.)

Cambiadores 1-2 y 2-4

El cambiador 1-2, tal como se ilustra en la Fig. 13-5, consiste en un paso de carcasa y dos o más pasos de tubos (número par de pasos de tubos). El diseño es quizá el más común de todos los cam-

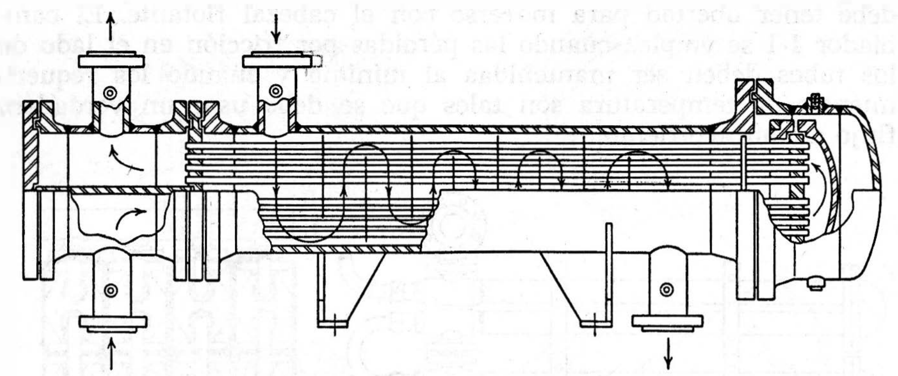


FIG. 13-5. Cambiador uno-dos: carcasa de paso sencillo, tubos de dos pasos, haz de tubos removible. (Cortesía de Engineers and Fabricators, Inc.)

biadores de carcasa y tubos y es el más simple de mantener. En el cambiador 2-4, como se puede observar en la Fig. 13-6, por medio de la instalación de un deflector longitudinal se logran dos pasos de carcasa en una carcasa sencilla. Este cambiador puede tener dos o más pasos de tubos, siempre en número par.

Las carcasas con más de dos pasos son imprácticas, pero conectando cambiadores en serie pueden obtenerse las ventajas de pasos adicionales de carcasas. De esta manera, dos cambiadores 1-2 conectados en serie serían equivalentes a un cambiador 2-4. El cambiador de dos pasos de carcasa es más difícil de mantener, puesto que el deflector longitudinal requiere un diseño más complejo. La carcasa de dos pasos se usa con más propiedad para fluidos limpios.

Rehervidores

La fuente primordial de suministro de calor para la mayoría de las columnas de destilación es el rehervidor. Un rehervidor es un

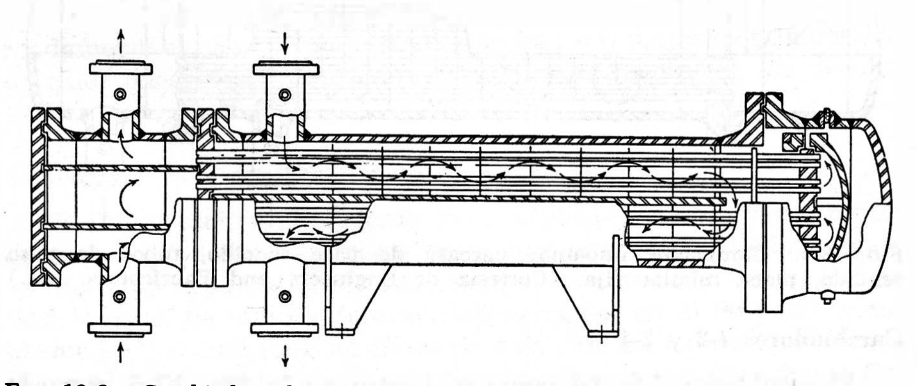


FIG. 13-6. Cambiador dos-cuatro: carcasa de dos pasos, tubos de cuatro pasos, haz de tubos removible, deflectores transversales arreglados para flujo de lado a lado. (Cortesía de Engineers and Fabricators, Inc.)

cambiador de calor diseñado para suministrar calor y permitir un fácil control de las condiciones en la torre de destilación. Uno de los primeros métodos para suministrar calor al fondo de la columna de destilación consistió en insertar un haz tubular de intercambio de calor en el fondo de la torre. Esto se hace todavía en ciertos casos pero no es muy popular debido a que el mantenimiento es más que problemático. Los grandes haces tubulares son difíciles para el diseño y muy incómodos para el servicio.

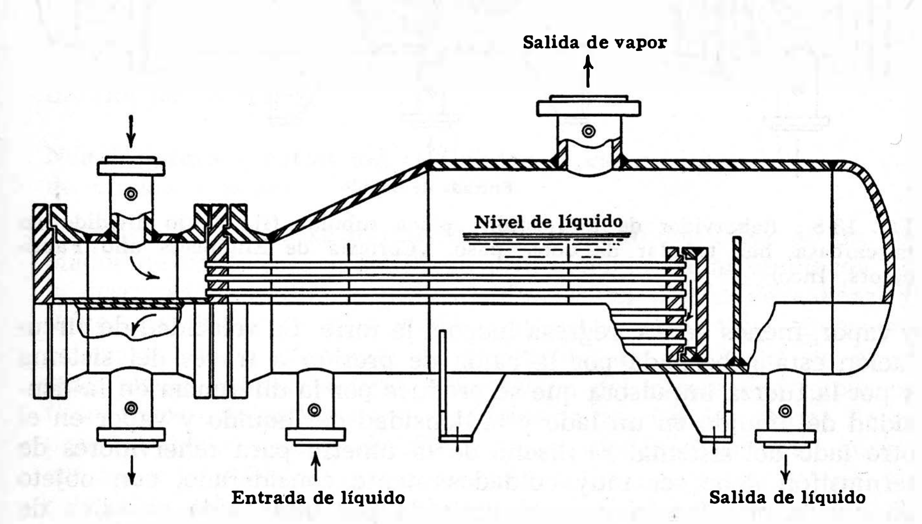


FIG. 13-7. Rehervidor tipo marmita: haz tubular de dos pasos, removible. (Cortesía de Engineers and Fabricators, Inc.)

Los rehervidores tipo marmita (Fig. 13-7) se construyen de manera similar a los evaporadores pequeños. En el extremo del haz tubular, y a modo de que éste sea cubierto por completo por el líquido, se localiza un vertedero. Se habilita un gran espacio de vapor. Todo el calor suministrado por el hervidor de marmita es regresado a la torre por los vapores de la parte superior del rehervidor. Este tipo de rehervidor, por consiguiente, funciona como un paso de separación similar a un plato teórico.

Los rehervidores de termosifón, tal como se ilustra en la Fig. 13-8, son los que más comúnmente se usan en la industria de proceso. El diseño del termosifón, es similar a un cambiador estándar de calor, tipo de carcasa y tubos, excepto que la entrada y las salidas por lo general se localizan en la parte media de la carcasa, de manera que el flujo puede ser dividido por igual entre las dos mitades del cambiador. Este arreglo de flujo subdividido asegura caídas de presión bajas en el lado de la carcasa.

El líquido del fondo de la torre de destilación pasa al rehervidor de termosifón y es parcialmente vaporizado. Esta mezcla de líquido

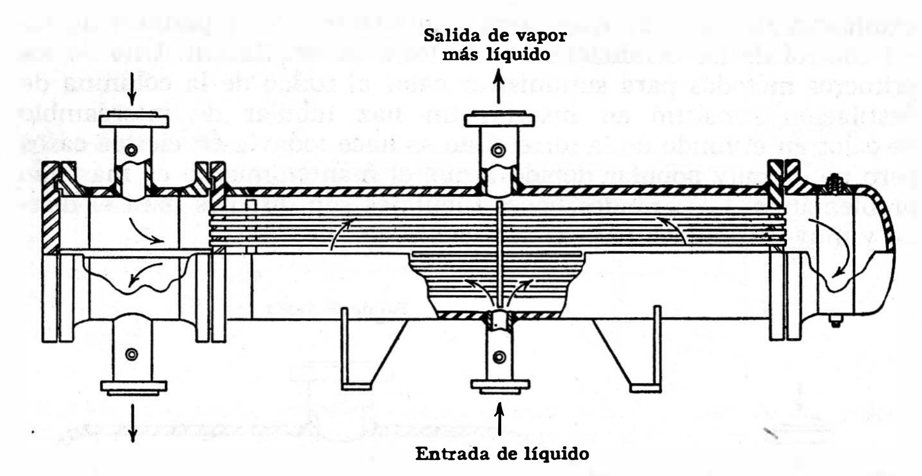


FIG. 13-8. Rehervidor de termosifón: placa tubular fija, flujo dividido en la carcasa, haz tubular de doble paso. (Cortesía de Engineers and Fabricators, Inc.)

y vapor, menos densa, regresa luego a la torre. La velocidad de circulación está gobernada por la caída de presión a través del sistema y por la fuerza impulsora que se produce por la diferencia en la densidad del líquido en un lado y la densidad del líquido y vapor en el otro lado del sistema. El diseño de la tubería para rehervidores de termosifón debe ser muy cuidadosamente considerado, con objeto de que la circulación no esté limitada por una caída excesiva de presión del sistema de tuberías. En todos los cálculos de caída de presión relacionados con diseño de tuberías para rehervidores, debe aplicarse un factor de seguridad de dos, cuando menos.

Condensadores

Generalmente los condensadores son cambiadores estándares 1-2 con faja de vapor o distribuidores anulares en el orificio de entrada de vapor. Este diseño permite una mejor distribución del vapor y elimina pérdidas excesivas a la entrada. Otras modificaciones se hacen a manera de que el arreglo de los orificios de entrada y salida dividan el flujo para mantener la caída de presión al mínimo.

Cambiadores verticales

Aunque la mayoría de los cambiadores de calor se colocan en posición horizontal, se presentan ciertas situaciones en las cuales se prefiere un cambiador vertical. Cuando se requiere subenfriamiento, un condensador vertical con frecuencia es preferible al condensador horizontal. En un condensador horizontal el subenfriamiento puede ser logrado propiciando un sello de vuelta a 360°, sumergido, a modo de que una parte de los tubos esté cubierta por líquido, pero de ma-

nera que la cantidad de superficie sumergida no sea proporcional a la altura del líquido. Muchos operadores piensan que el subenfriamiento en condensadores verticales se controla mejor que en condensadores horizontales. Sin embargo, la unidad vertical es más difícil de mantener y requiere un espacio vacío arriba de ella igual a su longitud, para poder remover el haz tubular.

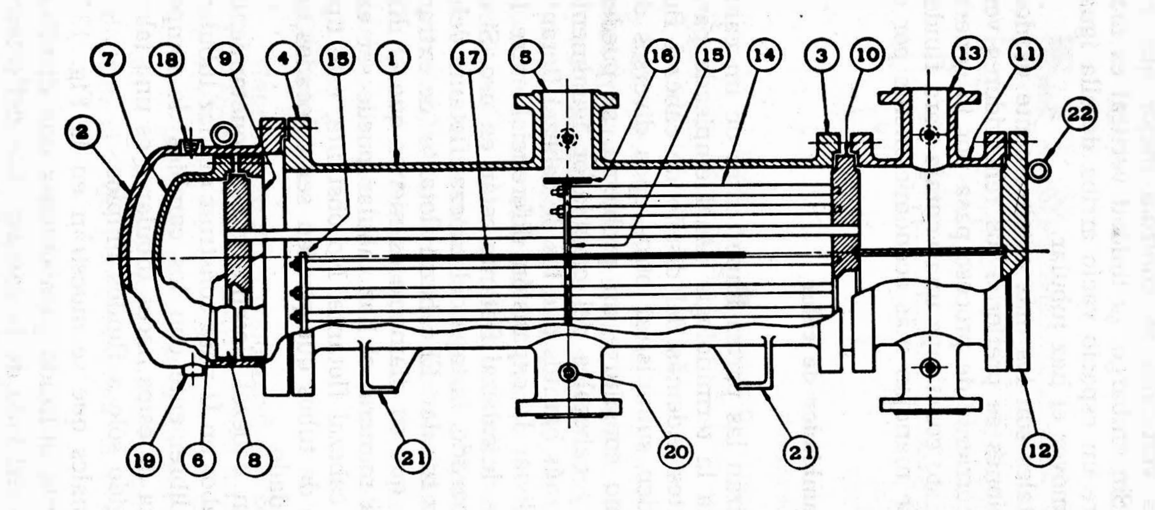
Los rehervidores horizontales son los más extensamente usados, aunque para ciertas instalaciones se prefieren los rehervidores verticales. En estos últimos la corriente de proceso pasa por lo general por el interior de los tubos. Esto constituye una ventaja para fluidos que ensucian, ya que éstos se manejan más económicamente por el interior de los tubos.

Nomenclatura y partes del cambiador de calor de carcasa y tubos

En la Fig. 13-9 se muestran las partes importantes de un cambiador de calor y se presenta la terminología usual empleada para la descripción de dichas partes. Además del diseño de cabezal flotante que se ilustra, se pueden suministrar otros tipos diversos de cabezales. Si la expansión no constituye un problema, se pueden usar placas tubulares fijas y cabezales del cambiador igualmente fijos. Estos cambiadores son más baratos que los de cabezal flotante pero no tienen medios de aliviar la expansión diferencial entre la carcasa y los tubos. Dos tipos de cabezal flotante están en uso. Si el cabezal es del tipo de anillo partido, la tapa del cabezal flotante debe ser removida antes que el haz tubular. El cabezal flotante "de extracción" está diseñado de modo que su diámetro es menor que el diámetro de la carcasa. De esta manera, el haz tubular puede ser extraído sin quitar la tapa del cabezal flotante. No obstante, este tipo de arreglo reduce el número de tubos que pueden ser colocados en una carcasa de un diámetro dado.

Para evitar el uso de un cabezal flotante y empaquetamiento interno, es posible emplear tubos en U para construir un haz tubular. Las curvas U se expanden libremente con los cambios de temperatura. Puesto que la limpieza de estos haces tubulares es una labor difícil, su uso queda restringido sólo a fluidos limpios.

Los deflectores longitudinales que se muestran en la Fig. 13-9 son el medio más ampliamente utilizado para obtener una distribución apropiada de los fluidos del lado de la carcasa. Los deflectores con orificios, forman espacios anulares alrededor de cada tubo a través de los cuales pasa el fluido de la carcasa, y tales deflectores pueden usarse para fluidos limpios, que no ensucian. La utilidad limitada del deflector de orificios, así como los prejuicios en su contra por parte de muchos usuarios anteriores, han hecho prácticamente obsoleto este tipo de deflector.



NOMENCLATURA

1. Carcasa
2. Tapa de la carcasa
3. Brida de la carcasa en el extremo de la garganta
4. Brida de la carcasa en el extremo de la tapa
5. Orificio de la carcasa
6. Placa tubular flotante
7. Cabezal flotante
8. Brida del cabezal flotante
9. Dispositivo de soporte del cabezal flotante
10. Placa tubular estacionaria
11. Garganta
12. Tapa de la garganta
13. Orificio de la garganta
14. Tirantes y espaciadores
15. Deflectores transversales o placas de soporte
16. Deflectores de choque
17. Deflector longitudinal
18. Conexión de venteo
19. Conexión de purga
20. Conexión de muestreo
21. Asientos de soporte
22. Anillo de elevación

FIG. 13-9. Partes y nomenclatura de un cambiador de calor. [Reimpreso con autorización, *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 3a. Ed. (1952).]

Enfriador de serpentín en caja

Cuando se dispone de un suministro adecuado de agua, el serpentín de tubo sumergido, o enfriador de serpentín en caja, es una de las superficies de enfriamiento más baratas. El material por enfriar pasa a través de una serie de tubos rectos conectados por medio de curvas de retorno. Todo el serpentín se coloca en una gran caja o artesa construida de concreto, madera, o acero. El agua de enfriamiento generalmente entra al fondo de la caja y pasa sobre un vertedero que hay en el extremo opuesto. Construir serpentines de tubo es relativamente sencillo, y las cajas por lo general son lo bastante grandes para acomodar longitudes adicionales de serpentines cuando se hagan necesarias otras cargas de enfriamiento. Esta flexibilidad, junto con el bajo costo y facilidad de reemplazar los tubos corroídos o erosionados han hecho bastante popular al enfriador de serpentín en caja para el enfriamiento de corrientes corrosivas o erosivas. Estos enfriadores son particularmente utilizables cuando la temperatura de salida no es crítica, o sea cuando los materiales enfriados se van a bombear al almacenamiento. El control de temperatura del enfriador de serpentín en caja es mucho más difícil que en el caso del cambiador normal de carcasa y tubo.

Serpentines de tubo

Uno de los medios más sencillos, aunque no siempre el más eficiente, de suministrar o quitar calor a un tanque o a un equipo de planta piloto, consiste en un serpentín de tubo helicoidal. Estos serpentines son de fácil construcción y pueden ser colocados en un pequeño tanque hecho a partir de un tubo de diámetro grande y ser utilizados como enfriadores de muestras o como enfriadores de planta piloto. Los serpentines de tubo también se utilizan para calentar el contenido de tanques y reactores.

Enfriadores de trombón o de escurrimiento

El enfriamiento de materiales en extremo corrosivos a menudo es un trabajo difícil y caro. El enfriador de trombón, o de escurrimiento, ha sido utilizado con notorio éxito. Consiste en tramos rectos de tubo conectados en serie por medio de curvas de retorno. Sobre los tubos se deja escurrir agua, la cual se recoge en una artesa colocada debajo de la unidad. Parte del agua se evapora conforme desciende por los tubos. Estos pueden ser fabricados con cualquier material que soporte al fluido que va a circular por su interior. Para materiales corrosivos, tales como el HCl húmedo, los tubos de cerámica han sido especialmente populares.

Cambiadores enfriados con aire

Muchas regiones del mundo padecen seria escasez de agua. El desarrollo del cambiador enfriado con aire ha permitido la construcción de plantas de proceso aun en áreas en donde la escasez de agua es un problema constante. Estas unidades de enfriamiento por lo general constan de un gran número de tubos con aletas transversales. El fluido por enfriar circula por los tubos, los cuales reciben el aire por medio de un ventilador, ya sea de tiro inducido o bien forzado. Debido a la alta resistencia de las películas de gas, estos enfriadores de aire requieren grandes áreas superficiales, y por consiguiente un espacio también grande, por Btu de calor transmitido.

FABRICACION DE CAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS

Normas

La Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares ha publicado normas detalladas para el diseño y construcción de cambiadores de calor de carcasa y tubos.[23] Las normas mecánicas han sido divididas en tres partes, las cuales representan tres diferentes clases de cambiadores de calor, Clases *R*, *C* y *A*. La Clase *R* está diseñada para satisfacer los requerimientos de refinerías de petróleo y de operaciones petroquímicas de alta presión. La Clase *C* está diseñada para satisfacer las condiciones generales de procesos que implican presiones y temperaturas moderadas y fluidos relativamente no corrosivos. La Clase *A* está diseñada para el uso de materiales de construcción a base de aleaciones y para el manejo de fluidos a alta temperatura o especialmente corrosivos. La Clase *R* especifica mayores tolerancias de corrosión que la Clase *C* y, en general, tiene requerimientos de construcción más rígidos.

Las longitudes de tubos están especificadas por estas normas en 8, 12 o 16 pies (2.4, 3.6 o 4.8 m). Los diámetros más comunes para los tubos son ¾ y 1.0 plg (19 y 25 mm), aunque el uso de tubos de 1¼ y 1½ plg (31 y 38 mm), así como de diámetros más pequeños, está permitido en donde condiciones especiales lo justifican.

Los tamaños de las carcasas también han sido normalizados. Los tamaños hasta de 23 plg (57.5 cm), de diámetro interior nominal, se construyen de tubo. Por arriba de dicha medida, se fabrican con lámina rolada.

La distancia mínima entre centros de tubos se ha establecido en 1¼ veces el diámetro exterior del tubo. El espaciamiento mínimo entre deflectores es ⅕ del diámetro interior de la carcasa, o 2 plg (51 mm), lo que resulte mayor. Las conexiones de venteo y de purga son de ¾ plg (19 mm). Estas y otras muchas normas, incluyendo

las tolerancias dimensionales, están cuidadosamente especificadas por la Asociación de Fabricantes de Cambiadores de Calor. Uno de los beneficios más grandes de dicha normalización reside en la simplicidad de almacenamiento de partes de repuesto.

Procedimiento de fabricación

En la Fig. 13-9 se ilustran diversas partes de un cambiador de calor de carcasa y tubos. La referencia a esta figura ayudará a comprender la siguiente explicación. La carcasa del cambiador de calor, siendo un recipiente a presión, está fabricada de la misma manera que se indicó en el Cap. 12. Estas carcasas se fabrican de acuerdo con los Códigos API-ASME* o ASME para Recipientes a Presión. En las costuras longitudinales, y también en la mayoría de las costuras circunferenciales, se usa, casi exclusivamente, soldadura automática. Las grandes bridas que se necesitan para las tapas de la carcasa y de la garganta, requieren cuidadosas operaciones de refrentado.

El ensamble del haz tubular es una operación interesante. Las placas tubulares se cortan de lámina de acero o de lámina de latón. Para latón, el corte es, por lo general, una operación mecánica, pero para placas tubulares de acero se usan sopletes de soldadura autógena. En seguida, después de haberlos localizado en su espaciamiento y orientación adecuados, se taladran en la placa los agujeros para los tubos. Luego, en dichos agujeros, se fresan unas ranuras. En el deflector transversal también se taladran otros agujeros para acomodar los tubos. Deflectores, placa tubular, tubos, tirantes y espaciadores, todo se lleva a un tren de montaje, en donde las placas tubulares se colocan con seguridad y con el espaciamiento correcto para un cambiador dado. Los tirantes son atornillados entonces en las placas tubulares. Los deflectores se deslizan en los tirantes de soporte y se colocan con firmeza en su lugar apropiado. Luego se pasan los tubos a través de la placa tubular y del deflector, y se fijan en su lugar por medio de una operación de expansión. Primero se sujetan a un acomodamiento preliminar forzando un tapón contra ellos. El tapón evita que el tubo dé vuelta al insertar el expansor de rodillos.

En la Fig. 13-10 se ilustra la sección transversal de una operación de expansión. Los tubos son expandidos dentro de las ranuras con objeto de producir una junta más fuerte. La expansión de los tubos requiere operadores experimentados, ya que una sobreexpansión adelgazará innecesariamente el metal y ocasionará una pronta falla del tubo.

Los tubos pueden ser de diferentes metales: acero inoxidable, diversas aleaciones de cobre, incluyendo bronce, latón o metal "admi-

* *American Petroleum Institute-American Society of Mechanical Engineers* (Instituto Americano del Petróleo—Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). (N. del T.)

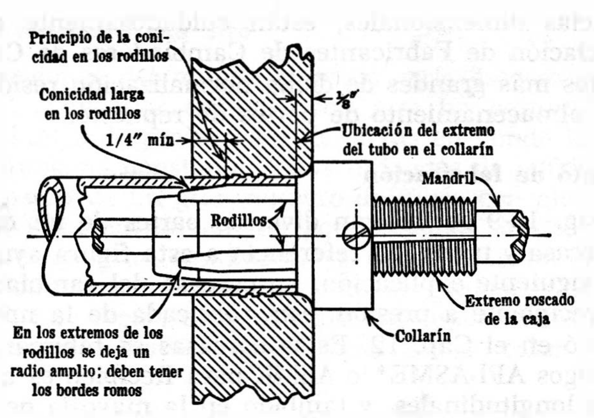


FIG. 13-10. Operación de expansión del tubo. (Cortesía de Bridgeport Brass Company.)

ralty".* En servicios severos, el aluminio, metal Monel, níquel y otros materiales se usan ampliamente. No es poco común encontrar condiciones en las que los fluidos, tanto del exterior como del interior de los tubos, son en extremo corrosivos y, además, requieren un metal diferente para cada lado. Para solucionar este problema se pueden usar tubos que combinan dos metales. Los metales se unen de manera permanente, uno hacia el interior y otro hacia el exterior. Estas combinaciones incluyen acero y metal "admiralty", aluminio con cobre o latón, y aleaciones de acero con aleaciones de cobre.

Utilizando un mismo espaciamiento (distancia entre los centros de los tubos) es posible colocar más tubos en una carcasa dada si se emplea un espaciamiento triangular** (colocando los tubos en los vértices de triángulos equiláteros) que empleando un espaciamiento cuadrado (colocando los tubos en la esquina de un cuadrado). No obstante, el uso del espaciamiento cuadrado se recomienda siempre que en el exterior de los tubos tenga que haber fluidos que ensucian. Este arreglo presenta un mejor acceso para la limpieza de los tubos y por consiguiente, un mantenimiento más sencillo. Cuando los líquidos que ensucian deben ser manejados por el interior de los tubos, por lo general se evitan tamaños menores de ¾ plg (19 mm) y del Núm. 14 BWG.***

Una vez que el haz tubular está completo, se lleva a un dispositivo de pruebas en donde se sujeta a una prueba hidráulica. Luego los haces son bajados verticalmente dentro de las carcasas del cambiador y se efectúa la prueba hidráulica final del cambiador. Por último, el exterior de la carcasa se pinta con una pintura anticorro-

* El metal "admiralty" es un latón al estaño: Cu, 71%; Zn, 28%, y Sn, 1%. (N. del T.)
** Espaciamiento en "tresbolillo". (N. del T.)
*** BWG, significa Birmingham Wire Gage y es una medida del grosor del tubo. En los manuales aparecen los grosores correspondientes a los diversos números BWG.

siva y todas las bridas se cubren para protegerlas de daños, con lo cual la unidad queda lista para ser embarcada.

DISEÑO DEL CAMBIADOR DE CALOR

La ecuación básica para el diseño de un cambiador de calor es, quizá, familiar para la mayoría de los ingenieros que han llevado un curso de introducción al tema de transmisión de calor.

$$A_O = \frac{q}{U_d \Delta T} \quad \text{o} \quad \frac{qR_d}{\Delta T} \tag{1}$$

en donde A_o = superficie efectiva requerida del cambiador de calor, basada en el área superficial exterior de los tubos, en pies cuadrados

q = calor transmitido, en Btu/hr

ΔT = diferencia media de temperaturas entre el fluido frío y el fluido caliente (ésta es la fuerza impulsora), en °F

U_d = coeficiente total de diseño de transmisión de calor, en Btu/(hr)(°F)(pies²), basado en el área superficial exterior

R_d = resistencia total de diseño $1/U_d$, basada en el área superficial exterior

La cantidad de calor transmitida es directamente proporcional al área superficial y a la fuerza impulsora ΔT, y es inversamente proporcional a la resistencia total al flujo de calor R_d. Esta resistencia está compuesta de varias resistencias en serie, las que, como las resistencias eléctricas, son aditivas. Estas resistencias son:

1. Resistencia de la película fluida sobre el interior del tubo.
2. Resistencia de la incrustación sobre el interior del tubo, r_i.
3. Resistencia de la pared del tubo.
4. Resistencia de la incrustación sobre el exterior del tubo, r_O.
5. Resistencia de la película fluida sobre el exterior del tubo.

Por lo tanto

$$\frac{R_d}{A_O} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{r_i A_i} + \frac{L_w}{A_m k_w} + \frac{r_O}{A_O} + \frac{1}{h_O A_O}$$

o

$$R_d = \frac{A_O}{h_i A_i} + r_i \frac{A_O}{A_i} + \frac{A_O L_w}{A_m k_w} + r_O + \frac{1}{h_O}$$

en donde h_i = coeficiente de la película interior, Btu/(hr)(pie²)(°F)

h_O = coeficiente de la película exterior, Btu/(hr)(pie²)(°F)

r_i = resistencia de la incrustación interior o factor de ensuciamiento interior, (°F)(pie²)(hr)/Btu

r_O = resistencia de la incrustación exterior o factor de ensuciamiento exterior, (°F)(pie²)(hr)/Btu

L_w = grosor del tubo, pies
k_w = conductividad del tubo, Btu/(hr)(°F)(pie)
A_m = promedio de A_i y A_o, pies²
A_o = área superficial exterior del tubo, pies²
A_i = área superficial interior del tubo, pies²

Puesto que, por definición, $R_d = 1/U_d$, entonces

$$U_d = \frac{1}{\dfrac{A_O}{h_i A_i} + r_i \dfrac{A_O}{A_i} + \dfrac{A_O L_w}{A_m k_w} + r_O + \dfrac{1}{h_O}} \tag{2}$$

El coeficiente total U_d es el término más conocido en el comercio de cambiadores y es el que se usará aquí.

El problema principal en el diseño de cambiadores de calor es la evaluación de las resistencias individuales que aparecen en la Ec. 2. La estimación de los coeficientes exterior e interior de película, especialmente el exterior, ha sido uno de los problemas más intrincados.

Coeficiente de película interior

Nusselt[16] demostró, por análisis dimensional, que el coeficiente de película interior estaba relacionado con las propiedades del fluido y el diámetro del tubo, en la manera siguiente:

$$\frac{h_i D}{k} = \alpha \left(\frac{DG}{\mu}\right)^a \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^c \left(\frac{L}{D}\right)^i \tag{3}$$

en donde D = diámetro interior, pies
G = flujo en masa, lb/hr-pie²
μ = viscosidad del fluido, lb/pie-hr
k = conductividad térmica del fluido, Btu/(hr)(°F)(pie²/pie)
C_p = capacidad calorífica del fluido, Btu/(lb)(°F)
L = longitud de tubo, pies

$\dfrac{DG}{\mu}$ = número de Reynolds

$\dfrac{C_p \mu}{k}$ = número de Prandtl

Es importante tener en cuenta que cada uno de los factores es adimensional, y que dentro de cada uno de ellos se deben emplear unidades consistentes.

α, a, c e i son constantes que deben ser determinadas experimentalmente y, con posterioridad a la derivación de Nusselt de 1910, se ha efectuado una cantidad considerable de trabajo experimental

para evaluar constantes consistentes que pudieran aplicarse a todos los fluidos. La mayor parte del trabajo inicial fue efectuado con aire y agua, y las correlaciones se basaban en propiedades desarrolladas a la temperatura de la película. Teóricamente, esta temperatura parecería correcta, pero muy molesta de emplear en diseño, porque tenía que ser estimada por tanteos. En 1929 Morris y Whitman[14] intentaron una correlación basada en diversos fluidos y usaron la temperatura promedio de la masa en lugar de la temperatura de la película. Obtuvieron una relación que era consistente para fluidos que se estaban enfriando y otra relación para fluidos que se estaban calentando. Luego siguieron Dittus y Boelter[5] con su conocida ecuación basada en la temperatura de la masa y en el flujo en la región turbulenta (arriba de un número de Reynolds de 10 000) en donde la relación L/D no tenía efecto.

Calentamiento: $$\frac{h_i D}{k} = 0.024 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{0.4}$$

Enfriamiento: $$\frac{h_i D}{k} = 0.026 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{0.3}$$

El deseo de encontrar una ecuación que expresara tanto el calentamiento como el enfriamiento alentó la investigación ulterior. Sieder y Tate[22] pensaron que la relación entre la viscosidad en el seno del fluido y la viscosidad en la pared producía un cambio en la distribución de velocidad de las corrientes individuales de fluido. Una distribución tipo se obtiene en el calentamiento y otra en el enfriamiento. Durante el enfriamiento, la viscosidad en la pared es mayor que en la masa del fluido, y lo opuesto es valedero para el calentamiento. Los dos científicos citados en último término decidieron introducir otro factor adimensional, la relación de viscosidad en la masa del fluido a viscosidad en la pared, μ/μ_w. El exponente fue determinado de manera experimental, y a partir de los datos se desarrollaron las siguientes ecuaciones, aplicables tanto al enfriamiento como al calentamiento:

Flujo laminar (Re = 2 100 o menor)

$$\frac{h_i D}{k} = 1.86 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{1/3} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{L}{D}\right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{6}$$

Flujo turbulento (Re = 10 000 o mayor)

$$\frac{h_i D}{k} = 0.027 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{7}$$

La zona de transición que queda entre los números de Reynolds de 2 100 y 10 000, no fue fácilmente representada por una ecuación.

En lugar de ello se encontró más simple representar gráficamente las Ecs. 6 y 7, como sigue:

$$\frac{DG}{\mu} \text{ versus } \left(\frac{h_i D}{k}\right)\left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^{-1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14}$$

En coordenadas logarítmicas las ecuaciones anteriores producen una sola línea recta para la zona turbulenta y una serie de líneas para diversos valores de L/D en la zona laminar. La zona de transición se determinó entonces extrapolando los dos juegos de curvas y efectuando verificaciones con datos experimentales.

Las curvas y ecuaciones de Sieder-Tate se han vuelto las estándares y se usan ampliamente en diseño de cambiadores de calor para toda clase de fluidos. Se han desarrollado otras ecuaciones que son más exactas para fluidos específicos. No obstante, las curvas de Sieder-Tate han resultado las más extensamente aplicables y están incluidas en los Estándares de la Asociación de Fabricantes de Cambiadores de Calor Tubulares.[23]

Las ecuaciones de Sieder-Tate pueden ser rearregladas multiplicando ambos lados por $c_p\mu/DGc_p$, con lo cual resulta la forma:

$$\frac{h}{C_pG} = A\left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^{-2/3}\left(\frac{DG}{\mu}\right)^{-0.2}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

Esta forma es particularmente útil para gases puesto que $c_p\mu/k$ tiende a ser constante en rangos de temperaturas normales para un gas, y se elimina el difícil problema de encontrar valores para conductividades gaseosas.

Coeficiente de película exterior

Cambiador de doble tubo

El coeficiente de película para el exterior de los tubos presenta un problema más complicado. En el sencillo caso de un simple cambiador de doble tubo, se sigue el familiar procedimiento de ingeniería consistente en emplear un diámetro equivalente, D_e, en lugar del término D, utilizando la ecuación para el coeficiente de película interior. Este diámetro equivalente se define como cuatro veces el radio hidráulico, el cual puede ser cuatro veces el área de la sección transversal dividida entre el perímetro mojado o el perímetro calentado. El perímetro mojado es el mismo diámetro equivalente que se usa en el cálculo de la caída de presión, y es $D_2 - D_1$. (D_2 es el diámetro interior del tubo exterior y D_1 el diámetro exterior del tubo interior). Basado en el perímetro calentado, D_e se convierte en $(D_2^2 - D_1^2)/D_1$. Los intentos efectuados en la correlación de datos empleando ambos tipos de diámetro equivalente, produjeron igual exactitud. Sin embargo, hasta tener más datos disponibles el uso del

mismo diámetro equivalente $(D_2 - D_1)$ requerido para los cálculos de caída de presión, parece ser lo más conveniente.

Cambiador de superficie aumentada

El coeficiente exterior de un cambiador de superficie aumentada se complica por las variaciones de temperatura a lo largo de la aleta. Se debe obtener algún valor compensado de coeficiente de transmisión de calor para la combinación de superficie de aleta con tubo plano. En el exterior del tubo es difícil establecer una área básica debido a las muchas variaciones de arreglos de aleta que son posibles. Por consiguiente, todos los cálculos de superficie aumentada se basan en el área interior.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{f_i}} \tag{8}$$

en donde h_{fi} es el coeficiente del lado de la aleta, basado en el área superficial interior del tubo. h_{fi} está relacionado al coeficiente exterior promedio para la aleta y para la superficie desnuda, h_f, por la expresión

$$q = h_{f_i}A_i\,\Delta T = h_f(A_{fe} + A_O)\,\Delta T$$

o,

$$h_{f_i}A_i = h_f(\Omega A_f + A_O) \tag{9}$$

en donde A_{fe} = área efectiva de una aleta, equivalente al área total de la aleta, A_f, multiplicada por la eficiencia de la aleta, Ω

A_O = área superficial exterior del tubo, exclusiva del área que queda abajo de las aletas.

q = calor transmitido

El área de la aleta no es tan efectiva como el área superficial exterior, y la eficiencia de la aleta sirve para corregir esta área a una cantidad equivalente de superficie exterior. Murry[15] y Gardner[9] derivaron una expresión para la eficiencia de la aleta.

$$\Omega = \frac{\tan h\, mb}{mb}$$

en donde

$$m = \left(\frac{h_f P}{k a_x}\right)^{1/2} \tag{10}$$

k = conductividad de aletas y tubo, Btu/(hr)(°F)(pie²/pie)

P = perímetro de las aletas, pies

a_x = área transversal de las aletas, pies²

b = altura de las aletas, pies

La eficiencia de la aleta, por consiguiente, proporciona un medio de tener en cuenta las variaciones en el material de construcción, el tamaño, y el arreglo de las aletas.

DeLorenzo y Anderson[4] correlacionaron datos para diversos arreglos de superficie aumentada utilizando la forma de Sieder-Tate de la graficación de:

$$\left(\frac{h_f}{C_pG}\right)\left(\frac{c_p\mu}{k}\right)^{2/3}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad \text{versus} \quad \frac{D_eG}{\mu}$$

De es el diámetro equivalente definido como

$$4\left[\frac{\frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) - \text{área de sección transversal de aletas}}{\text{perímetro total mojado del lado de las aletas}}\right]$$

en donde D_1 = diámetro exterior del tubo interior
D_2 = diámetro interior del tubo exterior

Esta correlación permite el cálculo de h_f, el cual puede ser convertido a h_{fi} utilizando la Ec. 9. Conociendo h_i, coeficiente de película interior, se puede calcular el coeficiente U_i para el lado interior, limpio. El valor de diseño de U_i se debe determinar sumando los factores apropiados de incrustación o ensuciamiento. El factor de ensuciamiento en el lado de la aleta tiene la misma relación compleja que h_f a la resistencia basada en el área superficial interior. De aquí que el factor deba ser sumado a $1/h_f$ y que el h_f de diseño resultante se use para determinar un h_{fi} de diseño, a partir de la Ec. 9. Por lo que

$$\frac{1}{U_{d_i}} = \frac{1}{h_{fi}} + \frac{1}{h_i} + r_i$$

Coeficientes exteriores para cambiadores de carcasa y tubos

El coeficiente exterior, o del lado de la carcasa, de un cambiador de calor de carcasa y tubos, ha resultado ser el coeficiente más difícil de correlacionar. Anteriormente se aceptaba que para la convección forzada en el exterior de los tubos se podía aplicar una ecuación de la misma forma que la utilizada para el flujo por el interior de los tubos.

$$\frac{hD_O}{k} = a\left(\frac{D_OG}{\mu}\right)^n\left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^m \qquad (11)$$

en donde D_O = diámetro exterior del tubo, en pies

Pero, debido a las variaciones en el arreglo de deflectores y tubos, ha sido un verdadero problema correlacionar, con una sola ecuación, datos para todos los cambiadores de carcasa y tubos. Colburn[2] propuso la ecuación

$$\frac{h_OD_O}{k} = a\left(\frac{D_OG_{máx}}{\mu}\right)^{0.6}\left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^{1/3} \qquad (12)$$

en donde a = 0.33 para arreglo de tubos en tresbolillo y 0.26 para arreglo de tubos en línea.

Básicamente estos mismos datos están presentados en los Estándares de la Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares.[23] En dichos estándares $G_{máx}$ se denomina G_{ef} (gasto en masa efectivo), el cual se define como libras por hora que fluyen, divididas entre una área transversal efectiva de flujo. Esta área transversal efectiva de flujo representa el factor más difícil de definir y en los Estándares realmente no se hace intento alguno por definirlo. Debe, de alguna manera, tomar en cuenta claros de diseño, espaciamiento de deflectores, fugas y derivaciones de paso. Estos factores varían con el fabricante. Hasta donde se sabe, actualmente cada fabricante ha desarrollado algunos medios para obtener una área efectiva que permita una buena correlación de los datos de diseño con el comportamiento en la operación real. Por demás curioso es el hecho de que sólo hasta muy recientemente se ha establecido un enfoque sistematizado sobre el problema de los coeficientes del lado de la carcasa para los cambiadores comerciales.* Está en acción un programa de investigación en la Universidad de Delaware, bajo el patrocinio conjunto de ASME, API, TEMA** y muchos fabricantes de cambiadores y compañías de operación. Dicho programa implica el estudio de modelos idealizados con objeto de aislar las variables, y será proseguido por un estudio de cambiadores en escala totalmente comercial. Se espera que a partir de este trabajo se produzcan correlaciones útiles y más confiables. Para el lector que no tenga acceso a los diversos procedimientos, nomogramas o tablas confidenciales de las compañías, y que sirven para estimar de manera empírica el coeficiente exterior, la ecuación presentada por Donohue[7] se sugiere como la más confiable. Donohue propuso la ecuación:

$$\frac{hD_O}{k} = 0.22\left(\frac{DG_e}{\mu}\right)^{0.6}\left(\frac{C_p\mu}{k}\right)^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{13}$$

en donde G_e se define como W/S_e y W = lb/hr de fluido en circulación

$$S_e = \sqrt{(\text{área transversal de flujo})(\text{área de agujeros en los deflectores})}$$

$$= \sqrt{S_B S_c}$$

El área transversal de flujo, S_c, está basada arbitrariamente en el diámetro interior de la carcasa

$$S_c = [(ID) - (D_O)(N)][B] \tag{14}$$

en donde B = espaciamiento de los deflectores, en pies
N = número de tubos con el diámetro interno o cercano a él
ID = diámetro interior de la carcasa, en pies

---

* Short[20] realizó, en un cambiador de laboratorio, un estudio que ha sido de gran utilidad en el diseño de cambiadores.

** American Society of Mechanical Engineers. American Petroleum Institute, Tubular Exchanger Manufacturers' Association. (N. del T.)

El área de los agujeros de los deflectores es:

S_B = Area del segmento − área ocupada por los tubos

Las correlaciones de Donohue basadas en esta área efectiva presentan una exactitud razonable cuando se aplican a los cambiadores comerciales. Existen otras muchas correlaciones para llegar a una área efectiva, las cuales implican cálculos bastante más tediosos. Sin embargo, el grado de exactitud de dichas correlaciones no parece justificar el esfuerzo adicional requerido.

Coeficientes de condensación

La condensación de vapores en el lado de la carcasa de cambiadores horizontales, es una operación importante. Desafortunadamente la teoría, aunque voluminosa, es muy inadecuada. Puede decirse, sin lugar a dudas, que el diseño de un condensador de proceso, particularmente de uno que implique mezclas de vapores, es un arte. Para el principiante es mejor utilizar coeficientes totales típicos y evitar una gran cantidad de cálculos, cuya interpretación es difícil y problemática. Empleando un mecanismo altamente idealizado, Nusselt[17] consideró la condensación de vapores puros, tanto sobre superficies horizontales como verticales. Basadas en un flujo viscoso se derivaron las siguientes expresiones

Tubos horizontales

$$h = 0.725(k_f^3 \lambda \rho_f^2 g / D_O \mu_f \, \Delta t)^{1/4} \tag{15}$$

o

$$h \left[\frac{\mu_f^2}{k_f^3 \rho_f^2 g_c}\right]^{1/3} = 1.51 \left[\frac{4G'}{\mu_f}\right]^{-1/3} \tag{16}$$

Tubos verticales

$$h = 0.943 \, (k_f^3 \lambda \rho_f^2 g_c / \mu_f L \, \Delta t)^{1/4} \tag{17}$$

$$h \left(\frac{\mu_f^2}{k_f^3 \rho_f^2 g_c}\right)^{1/3} = 1.47 \left(\frac{4G'}{\mu_f}\right)^{-1/3} \tag{18}$$

en donde λ = calor latente de condensación, Btu/lb

g_c = 32.17

Δt = diferencia de temperaturas entre vapor saturado y superficie de condensación, °F

D_O = diámetro exterior del tubo, en pies

L = longitud del tubo, en pies

W = lb/hr

G' = flujo en masa del condensado, (lb/hr)(pie²)

$$\text{Tubo vertical: } G' = \frac{W}{\pi D_O}$$

$$\text{Tubo horizontal: } G' = \frac{W}{L}$$

ρ = densidad del condensado, lb/pie^3

El subíndice f se refiere a propiedades a la temperatura de la película.

Debido a la similitud de las Ecs. 17 y 18, a menudo se escriben como una sola ecuación utilizando una constante promedio de 1.50 y un valor apropiado de G'. Los tubos horizontales en hileras verticales presentan un problema adicional, puesto que el salpicado aumenta la turbulencia. Además, en cada tubo sucesivo se desarrollan películas más gruesas, lo cual hace que los tubos más bajos sean menos efectivos. Si los tubos están en tresbolillo, es de esperarse que los resultados difieran de los obtenidos para los arreglos en línea.

McAdams,[13] Donohue,[6] Kern,[12] y otros autores han propuesto métodos para calcular la G' que ha de usarse en la ecuación de Nusselt para bancos de tubos. Kern sugiere lo siguiente:

$$\text{Tubos verticales: } \quad G' = \frac{W}{N_t D_O}$$

$$\text{Tubos horizontales: } \quad G' = \frac{W}{N_t^{2/3} L}$$

en donde N_t = número total de tubos
W = flujo total de condensado, lb/hr

Para vapores solos, a partir de la ecuación de Nusselt pueden predecirse los coeficientes aproximados de condensación para el exterior de tubos horizontales y para el interior y el exterior de tubos verticales. En el caso de flujo turbulento del condensado y altas velocidades de vapor, resultan coeficientes mayores que los predichos a partir de la ecuación de Nusselt. Se han discutido[13] diversos métodos para calcular coeficientes bajo estas condiciones.

Con frecuencia los vapores entran a un condensador sobrecalentado. Parte del condensador actúa como un enfriador de gas y dicha parte en servicio de enfriamiento de gas opera con un coeficiente de transmisión mucho más bajo. Estas situaciones se manejan mejor calculando cada sección por separado. Se reportan un coeficiente total de transmisión, compensado, y una Δt compensada.

$$(U_{wt}) = \frac{(U_x)(A_x) + (U_G)(A_G)}{A_x + A_G}$$

x se refiere a la sección de condensación
G se refiere a la sección de enfriamiento de gas

$$\Delta t_{wt} = \frac{q}{\dfrac{q_x}{\Delta t_x} + \dfrac{q_G}{\Delta t_G}}$$

en donde q = calor total transmitido
q_x = calor transmitido en la sección de condensación
q_G = calor transmitido en la sección de enfriamiento de gas
Δt = diferencia media de temperaturas

La condensación de un solo vapor en presencia de vapores condensables o la condensación de vapores mezclados, son procesos difíciles de analizar. En cada caso el vapor se debe difundir a través de una película gaseosa antes de llegar a la superficie de condensación y el fenómeno es de transmisión de calor combinado con transferencia de masa. Se han descrito[3] métodos rigurosos para considerar tanto la difusión como la transmisión de calor en la determinación de un coeficiente de condensación. Estos métodos son necesariamente complicados e implican soluciones por tanteos. Por consiguiente, se han propuesto muchos métodos "rápidos" que incluyen ciertas suposiciones de simplificación, las cuales se conocían como incorrectas.

Los métodos en uso común pueden dividirse en dos clases. Una, considera sólo la transmisión de calor, suponiendo que el calor fluye a través de una serie de resistencias, incluyendo una película de vapor, una película de condensado, la pared del tubo, una película de impurezas y una película del líquido enfriador. La otra clase, la más rigurosa, considera tanto la transmisión de calor como la transferencia de masa. No es posible ni vale la pena revisar los diversos métodos que han sido propuestos. De manera bastante curiosa, la exactitud de cualquiera de los métodos disponibles es pobre. El mejor procedimiento consiste en adoptar para el propio uso el método más conveniente y utilizarlo continuamente. Los cálculos basados en este método deben ser comparados en cada oportunidad con los datos de operación, a modo de que el diseñador pueda desarrollar un cierto sentido para la relación entre el coeficiente real y el coeficiente calculado. Los miembros de la Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares están conscientes de que los cálculos existentes para condensadores son inadecuados y ya están tomando las medidas necesarias para remediar la situación.

En la condensación de mezclas de varios componentes, los materiales pesados se condensan primeramente a las temperaturas más altas y son subenfriados conforme avanzan hacia el extremo del cambiador. El diseñador de cambiadores debe ser suministrado con una curva de condensación para usarla en el diseño de los mismos (Fig. 13-11). La temperatura de la mezcla condensante se analiza en una gráfica contra el calor removido de la mezcla, y dicha temperatura se obtiene a partir de cálculos de equilibrio de vapor de expansión. Esta curva constituye una gran ayuda para diseñar un con-

densador, puesto que indica las regiones de sobrecalentamiento y subenfriamiento, y también se usa para obtener una diferencia compensada de temperaturas, tal como se describe más adelante.

Coeficientes de ebullición

El cálculo de coeficientes de ebullición en el diseño de rehervidores y equipo similar es, en las condiciones actuales de desarrollo, prácticamente imposible. La mayoría de los diseños están basados en cierto flujo admisible de calor (q/A en Btu/(hr)(pie^2)), y puesto que $q/A = U\Delta t$, U puede ser determinada a partir del flujo admisible de calor y un valor aceptable de Δt, el cual se basa en la práctica. Para líquidos orgánicos en circulación forzada, Kern[12] sugiere un

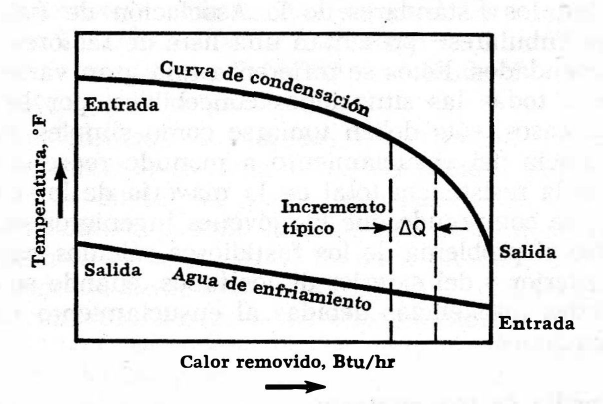


FIG. 13-11. Curva de condensación.

máximo de 20 000 Btu/(hr)(pie^2), y 12 000 para circulación natural. Como en los condensadores, a menudo una parte del rehervidor se utiliza en la transmisión de calor sensible, y en estos casos la región de calor sensible y la de ebullición se consideran por separado.

Resistencia de la pared del tubo

Como se da en la Ec. 2, la resistencia de la pared del tubo se calcula fácilmente, ya que las conductividades de la mayoría de los metales empleados en cambiadores de calor son bien conocidas. Con mucha frecuencia es muy pequeña en comparación con las otras resistencias, y puede ser despreciada.*

Factores de ensuciamiento

Durante el uso normal, las paredes interior y exterior de los tubos de un cambiador de calor llegan a recubrirse con un depósito

* No es cierto para transmisión de calor de líquido al metal, en cuyo caso la resistencia de la pared del tubo puede ser decisiva.

de impurezas, herrumbre o algas, dependiendo de los fluidos que circulen por el cambiador. Estos depósitos materialmente reducen la capacidad de un cambiador y finalmente deben ser removidos. La mayoría de las plantas han encontrado económico limpiar los tubos del cambiador durante las paradas normales o los periodos de mantenimiento, los cuales en muchas plantas pueden ser de tan sólo una vez al año. Por consiguiente, es necesario que el cambiador esté diseñado para operar a plena capacidad con un recubrimiento de impurezas e incrustación, equivalente al que se presentaría durante el uso entre dos ocasiones de limpieza. Tanto para el interior como para el exterior del tubo debe incluirse en el coeficiente total de transmisión una resistencia de ensuciamiento o factor de ensuciamiento. Con base en la experiencia de muchos usuarios de cambiadores de calor, los Estándares de la Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares[23] presentan una lista de factores de ensuciamiento recomendados. Estos se refieren a una gran variedad de fluidos pero no a todas las situaciones concebibles, por lo que, en el mejor de los casos, sólo deben tomarse como simples suposiciones.

La resistencia del ensuciamiento a menudo representa un gran porcentaje de la resistencia total en la mayoría de los cambiadores. Por lo tanto, se comprende que los jóvenes ingenieros se desanimen al enfrentarse al problema de los fastidiosos cálculos para los coeficientes del interior y del exterior de los tubos, cuando se dan cuenta que las grandes resistencias debidas al ensuciamiento resultan sólo meras estimaciones.

Diferencia media de temperaturas

Si se supone que el coeficiente total de transmisión de calor es constante en todo el cambiador, que existe un estado uniforme, que la capacidad calorífica es constante, que no ocurren cambios de fase (excepto bajo condiciones isotérmicas), y que el flujo a través del cambiador es paralelo o a contracorriente, entonces puede ser demostrado que la diferencia media de temperatura de la Ec. 1 corresponde a una media logarítmica de la diferencia de temperaturas entre el fluido caliente y el fluido frío en un extremo del cambiador, y el fluido caliente y el fluido frío en el otro extremo del cambiador. Esto se expresa matemáticamente como sigue

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \dfrac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

en donde ln = logaritmo natural

Δt_m = diferencia media de temperaturas

Δt_1 = diferencia de temperaturas en un extremo del cambiador

Δt_2 = diferencia de temperaturas en el otro extremo

Para facilitar este cálculo se han preparado numerosas tablas y nomogramas. No obstante, a menudo el uso de ciertas tablas requiere más esfuerzo que el pequeño trabajo implicado en efectuar, sencillamente, en una regla de cálculo las operaciones indicadas.

Los cambiadores de carcasa y tubos, que tienen más de un paso de tubos, ya no se operan en verdadero flujo a contracorriente. Por consiguiente, no es aplicable la diferencia media logarítmica de temperaturas. Se han desarrollado factores de corrección que pueden ser aplicados a la diferencia media logarítmica de temperaturas para obtener una verdadera diferencia de temperaturas, que se use en diversos arreglos de cambiadores de calores de carcasa y tubos, y en otros tipos de cambiadores tales como los enfriadores de flujo cruzado y de película o de escurrimiento. Estos factores se representan gráficamente en curvas convenientes, las cuales están reproducidas en los Estándares de la Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares. ($\Delta t_m = F_T LMTD$, en donde F_T es el factor de corrección obtenido de la gráfica.)

En la condensación de vapores mezclados, la temperatura se abate progresivamente en toda la condensación. Puesto que en la derivación de la diferencia media logarítmica de temperaturas se supuso que cualquier cambio de fase era isotérmico, el uso de la media logarítmica no se justifica. En su lugar debe usarse una diferencia compensada de temperaturas, la cual se calcula a partir de la curva de condensación para los vapores mezclados. Con referencia a la Fig. 13-11, se supone que el agua de enfriamiento fluye a contracorriente con las mezclas condensantes. A lo largo de la escala de temperatura se escogen pequeños incrementos de temperatura, y para cada incremento se calcula una diferencia media logarítmica de temperaturas. Este procedimiento se justifica, puesto que con pequeños incrementos de temperatura, la variación en la temperatura del vapor es ligera. Se calcula el cociente del calor extraído en el incremento escogido, entre la media logarítmica. La suma de estos valores incrementales se relaciona con la diferencia compensada de temperaturas:

$$\sum \frac{q}{\Delta t} = \sum UA = \frac{q_T}{\Delta t_w}$$

en donde $\Delta t_w = \Delta t$ compensada

q_T = carga calorífica total

Temperatura calorífica o temperatura promedio del fluido

En la expresión de la media logarítmica de temperaturas se supone que el coeficiente total de transmisión permanece constante en todo el cambiador. Esto rara vez se cumple, y Colburn intentó corregir esta suposición empleando temperaturas promedio que puedan ser utilizadas para evaluar las propiedades del fluido en la ecua-

ción del coeficiente de película. Con frecuencia estas temperaturas promedio se denominan temperaturas caloríficas y se definen como:

Fluido caliente: $T = T_1 + F_c(T_2 - T_1)$

Fluido frío: $t = t_1 + F_c(t_2 - t_1)$

en donde F_c = factor único para un sistema dado, y los subíndices 1 y 2 se refieren a los extremos opuestos del cambiador

El factor F_c, que es único para un sistema dado, puede obtenerse a partir de la gráfica generalizaaa para hidrocarburos, en TEMA.[23] Para líquidos no viscosos (por debajo de un centipoise) a rangos moderados de temperaturas, el valor de F_c es 0.5, y entonces la temperatura calorífica es simplemente el promedio de las temperaturas de entrada y salida. Tal es el caso para la mayoría de las soluciones inorgánicas.

Sieder[21] ha sugerido las siguientes reglas: (1) Para unidades enfriadas con agua, emplear un F_c de 0.3 para el fluido caliente en el lado de la carcasa; (2) para unidades calentadas con vapor, emplear $F_c = 0.55$ para el fluido que se está calentando en el lado de la carcasa; (3) para cambiadores de aceite–aceite, emplear 0.45 tanto para fluidos calientes como para fluidos fríos. Las temperaturas promedio así calculadas se usan para evaluar las propiedades que aparecen en la ecuación de transmisión de calor del coeficiente de película.

Temperatura de la pared del tubo

En las ecuaciones de Sieder-Tate se podrá observar que para evaluar μ_w se requiere un valor de temperatura para la pared del tubo. Sieder[21] señala que frecuentemente se puede suponer que dicho valor es igual a la temperatura del agua de salida en enfriadores de aceite y agua. También puede ser estimado por simple cálculo, basado en coeficientes de película que fueron calculados suponiendo que $\mu/\mu_w = 1.0$. Se utilizan las siguientes ecuaciones:

Fluido frío en tubos: $t_w = t + R(T - t)$

Fluido caliente en tubos: $t_w = T - R(T - t)$

en donde t_w = temperatura de la pared del tubo
t = temperatura promedio del fluido frío
T = temperatura promedio del fluido caliente

$$R = \frac{h_O}{h_i(A_i/A_O) + h_O} \text{ para tubos estándares}$$

$$R = \frac{h_i h_{f_i} A_i}{h_f(A_f + A_O)(h_i + h_{f_i})} \text{ para tubos con aletas}$$

Caída de presión

El problema de determinar la caída de presión en un cambiador de calor de carcasa y tubos se complica por el cambio progresivo que se opera en la temperatura de los fluidos. No obstante, Sieder y Tate[22] descubrieron que para flujo por el interior de tubos se podía usar el factor usual de fricción isotérmica, si éste se dividía entre un factor de corrección, $\phi = (\mu/\mu_w)^{0.14}$ para números de Reynolds superiores a 2 100, y $(\mu/\mu_w)^{0.25}$ para números de Reynolds inferiores a 2 100. En adición a la pérdida real de fricción en los tubos, hay pérdidas en los cabezales, flotante y de garganta, del cambiador, debidas a los cambios abruptos en la dirección del flujo, y también hay pérdidas a la entrada y a la salida.

Kern[12] sugiere que las pérdidas de la entrada y de la salida se estimen como iguales a la pérdida de un cabezal de velocidad, y que las pérdidas en los cabezales, flotante y de garganta, se supongan iguales a cuatro cabezales de velocidad, por paso.

Una caída exacta de presión en la carcasa, es tan difícil de calcular como un coeficiente de carcasa exacto. Se han propuesto varias ecuaciones. Quizá la más familiar es la presentada por Chilton y Genereaux.[1]

$$\Delta P = \frac{4f\rho u^2_{\text{máx}} N}{(2g_c)(144)} = 0.000432(f\rho u^2_{\text{máx}}\, N)$$

en donde ΔP = caída de presión, lb/plg² por paso
$u_{\text{máx}}$ = velocidad basada en el flujo a través de los espacios entre los tubos
ρ = densidad del fluido
g_c = 32.17
N = número de hileras horizontales
f = factor de fricción

Esta ecuación da la caída de presión a través del haz tubular. Grimison[10] determinó valores del factor de fricción y estos datos, en la forma en que Colburn los analizó posteriormente, se presentan en los Estándares TEMA,[23] correlacionados con el número de Reynolds. Al igual que en el caso de flujo por el interior de tubos, el factor de fricción obtenido de la gráfica, se divide entre la corrección $(\mu/\mu_w)^{0.14}$

Además de la caída de presión del flujo cruzado, también se produce una caída de presión conforme el fluido pasa a través de las aberturas de los deflectores. Estas aberturas pueden ser consideradas como un orificio con un coeficiente de descarga de 0.7, tal como ha sido demostrado por Donohue.[7] Por consiguiente, la caída de presión a través de las aberturas del deflector se puede expresar así:

$$\Delta P = \frac{\rho u^2}{144 g_c}$$

en donde u = velocidad a través de la abertura del deflector, pies/seg
ρ = densidad, lb/pie^3
g_c = 32.17
ΔP = caída de presión, lb/plg^2 por abertura de deflector

La caída total de presión en la carcasa es la suma de las caídas de presión del flujo cruzado, de las aberturas del deflector, y de la entrada y salida. Científicos investigadores en la Universidad de Delaware están estudiando y correlacionando datos de caída de presión en carcasas. Estos datos deben resultar sumamente valiosos, ya que la exactitud de los métodos existentes es cuestionable.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Los diseñadores de cambiadores de calor deben recibir determinada información antes que puedan comenzar su diseño. Con objeto de evitar dilaciones, el ingeniero de proyecto debe vigilar que cada fabricante que esté cotizando un cambiador, sea provisto de toda la información necesaria para completar un diseño satisfactorio. La Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares ha preparado una Hoja Estándar de Especificaciones de Cambiador de Calor,[23] la cual sirve como un recordatorio manual de la información requerida. La mayoría de los fabricantes de cambiadores usan esta forma para comunicar la información sobre el cambiador de calor que están proponiendo. La misma hoja es también valiosa como una forma de solicitud de cotización (Fig. 13-12) ya que en su parte superior se describe el comportamiento de la unidad y tiene un espacio para la información que debe ser suministrada por el usuario final. Se requieren los siguientes datos esenciales.*

Fluido en circulación. Los materiales comunes, tales como el agua, sólo necesitan identificarse por su nombre. Sin embargo, se necesitan descripciones completas de materiales menos comunes. Si el fluido es una mezcla compleja, se debe dar su composición, y si está compuesto de diversas fases (vapor y líquido), éstas deben ser definidas y debe establecerse la cantidad de cada una de ellas, incluyendo la cantidad de vaporización o condensación que se espera en el proceso de calentamiento o enfriamiento. Para estimar la mayoría de las propiedades físicas de hidrocarburos cuando se conocen el peso específico y el punto de ebullición, se dispone de ciertas correlaciones generalizadas. No obstante, es preferible proporcionar al diseñador la mayor cantidad posible de datos físicos y químicos.

Gravedad específica o densidad para líquidos. Esta información se requiere para el cálculo de la masa que fluye y para la estimación de otras propiedades a partir de tablas y nomogramas generalizados.

* Un análisis más detallado sobre este problema ha sido hecho por Oten.[18] Algunas de sus sugerencias han sido incorporadas en esta parte.

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE CAMBIADOR DE CALOR

1			Obra Núm.
2	Cliente		Referencia Núm.
3	Dirección		Solicitud de cotización Núm.
4	Localización de la planta		Fecha
5	Servicio de la unidad		Partida Núm.
6	Tamaño	Tipo	Conectada en
7	Superficie por unidad	Carcasas por unidad	Superficie por carcasa
		Comportamiento por unidad	
9		Lado de la carcasa	Lado de los tubos
10	Fluido circulado		
11	Total de fluido que entra		
12	Vapor		
13	Líquido		
14	Vapor de agua		
15	No condensables		
16	Fluido vaporizado o condensado		
17	Vapor de agua condensado		
18	Gravedad específica del líquido		
19	Viscosidad del líquido		
20	Peso molecular de los vapores		
21	Calor específico del líquido	Btu/lb	Btu/lb
22	Calor latente de los vapores	Btu/lb	Btu/lb
23	Temperatura de entrada	°F	°F
24	Temperatura de salida	°F	°F
25	Presión de operación	lb/plg²	lb/plg²
26	Número de pasos		
27	Velocidad	pies/seg	pies/seg
28	Caída de presión	lb/plg²	lb/plg²
29			
30			
31	Calor intercambiado, Btu/hr	Ton métricas/Día (Corregidas)	
32	Velocidad de transmisión de servicio	Coeficiente "limpio"	

33			**Construcción**			
34	Presión de diseño		lb/plg²		lb/plg²	
35	Presión de prueba		lb/plg²		lb/plg²	
36	Temperatura de diseño		°F		°F	
37	Tubos	Núm.	Diám. ext.	BWG	Longitud	Espaciamiento
38	Carcasa		Diám. int.	Diám. ext.	Espesor	
39	Tapa de la carcasa				Tapa del cabezal flotante	
40	Garganta				Tapa de la garganta	
41	Placas tubulares estacionarias				Flotantes	
42	Deflectores transversales		Tipo		Espesor	
43	Deflectores longitudinales		Tipo		Espesor	
44	Tirantes de los tubos				Espesor	
45	Empaquetaduras					
46	Conexiones carcasa entrada		Salida		Serie	
47	Garganta entrada		Salida		Serie	
48	Tolerancia de corrosión lado de la carcasa				Lado de los tubos	
49	Requerimientos de Código				Clase TEMA	
50	Pesos cada carcasa		Haz tubular		Lleno de agua	
51	Nota: Indíquese después de cada parte si se ha sujetado a alivio de esfuerzos (A.E.) y si se ha radiografiado (Rayos X)					
52	Observaciones:					

FIG. 13-12. Hoja de especificaciones de cambiador de calor. [Reimpreso con autorización, *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association.* 3a. Ed. (1952).]

Peso molecular. El peso molecular es importante para definir las propiedades de un gas.

Viscosidad. Como se vio en la discusión de los aspectos teóricos de la transmisión de calor, los datos de viscosidad son quizá los datos físicos más importantes que se requieren. La viscosidad es significativa tanto en las ecuaciones de transmisión de calor como en las de caída de presión. Se deben proporcionar cuando menos dos valores de viscosidad a diferentes temperaturas dentro del rango de operación. Interpolando en una gráfica logarítmica de temperatura contra viscosidad, se pueden obtener de manera normal valores adicionales suponiendo una relación lineal con la temperatura. Para hidrocarburos es posible una estimación más exacta utilizando la gráfica ASTM de viscosidad cinemática contra temperatura (Carta D, ASTM D-341).

Calores latentes y calores específicos. Aunque en la tabulación se incluye la carga del cambiador (calor intercambiado en Btu/hr), también se deben proporcionar los calores latentes y los calores específicos. El diseñador del fabricante puede entonces verificar los cálculos de la carga del cambiador. En el cálculo de los coeficientes de transmisión también se usan los calores específicos. Siempre que sea posible, se deben dar diversos valores a diferentes temperaturas dentro del rango de operación.

Corrosión. El diseñador debe recibir cualquier información sobre las características corrosivas del fluido y cualesquiera riesgos especiales asociados con el transporte del fluido.

En diversas obras sobre intercambio de calor se ha descrito el procedimiento para el diseño de un cambiador de calor. En particular, Kern[12] ha proporcionado algunos excelentes problemas ilustrativos, los cuales muestran la filosofía y factores involucrados.

Puesto que el cálculo de los coeficientes de película depende del tipo y diseño de cambiador, para determinar, por cálculo, el coeficiente total, es necesario suponer un tipo y tamaño de cambiador. El procedimiento general es como sigue:

1. Se especifican las condiciones de proceso. En adición a las cantidades que circulan, esto incluye especificar las temperaturas de entrada y salida de todas las corrientes.

Se han preparado algunas gráficas para la determinación de la temperatura óptima de salida del agua de enfriamiento. Empero, generalmente los factores económicos no están bien definidos, y el uso de tales gráficas es cuestionable. No obstante, ciertas condiciones hacen sencilla la selección de la temperatura del agua de salida. Para muchas aguas es necesario mantener la velocidad de flujo por encima de 4 pies por seg con objeto de prevenir el desarrollo de algas, y además se requiere, tal como lo sugiere Kern, evitar el calentamiento del agua a temperaturas mucho mayores a 120° con objeto

de no tener una corrosión excesiva. En donde se emplea torre de enfriamiento de agua, la operación de esta torre debe considerarse junto con la selección de la temperatura del agua de salida. Cuando entre dos corrientes de proceso se está efectuando un intercambio de calor, las temperaturas óptimas deben ser determinadas por medio de un estudio económico, haciendo un balance entre los costos del cambiador y los costos de los servicios. Este estudio debe incluir los otros cambiadores, enfriadores y calentadores requeridos para las dos corrientes consideradas, ya que una alteración en las temperaturas de salida y de entrada del cambiador de calor, afectará el tamaño de las otras unidades.

2. Se establece el recorrido de los fluidos. Con el transcurso de los años se han desarrollado ciertas reglas generales para establecer el recorrido de los fluidos. Los fluidos de alta presión y los fluidos corrosivos deben ser dirigidos por el interior de los tubos, dado que es más barato diseñar un tubo para alta presión, que toda una carcasa para el mismo efecto; además, circulando el fluido por el interior de los tubos, sólo éstos necesitan ser resistentes a la corrosión. Fluidos que produzcan mucho ensuciamiento, incluyendo el agua, deben ser dirigidos por el interior de los tubos. Debido a la flexibilidad que es posible obtener en los arreglos de los deflectores, los volúmenes extremadamente grandes o muy pequeños de fluidos, así como fluidos viscosos, circulan mejor a través de la carcasa. Cuando se requieren caídas bajas de presión se debe usar el lado de la carcasa.

3. Se supone un coeficiente total de diseño y se calcula una área tentativa.

4. Se selecciona la longitud, arreglo, espaciamiento y diámetro de los tubos. Cuando es posible, la estandarización es recomendable. Esta propicia la facilidad de mantenimiento, requiere el almacenamiento de menos partes y le da un aspecto más atractivo a la planta. Debe recordarse que los tubos cortos son mucho más caros, por pie cuadrado, que los tubos más largos (de doce o dieciséis pies).

5. Se determina el número mínimo de pasos, con base en el número total de tubos correspondientes al área tentativa. El número de pasos de tubos depende de la caída permisible de presión y del costo de construcción. Una reducción en el número de tubos de pasos por debajo del mínimo dará por resultado una velocidad de flujo más baja y, por consiguiente, mayores áreas superficiales. En este punto se debe hacer una verificación de la caída de presión en los tubos para tener la certeza de que el número escogido de pasos de tubos es satisfactorio.

6. Se selecciona el número de pasos de carcasa que dé un factor de corrección (F_T) de 0.75 a 0.8 o mayor, para la diferencia media logarítmica de temperaturas. Para valores de F_T inferiores a las cifras citadas, las curvas del factor de corrección se vuelven demasiado pronunciadas y un pequeño cambio en las condiciones de tem-

peratura origina un cambio considerable en el factor de corrección y, en consecuencia, la diferencia media de temperaturas también se afecta de manera importante. En dicha zona, por consiguiente, se debe entender que los errores inherentes a las suposiciones hechas en la derivación del factor de corrección se convierten en significativos, por lo que la zona de valores por debajo de 0.75 a 0.8 debe ser evitada. Si el factor de corrección es demasiado bajo para un paso de carcasa, con frecuencia un arreglo de dos pasos de carcasa producirá un F_T mayor, que sea aceptable. Se debe recordar que dos cambiadores con un paso de carcasa conectados en serie equivalen a un cambiador con dos pasos de carcasa.

7. Se selecciona un cambiador estándar que satisfaga lo mejor posible los requerimientos de los incisos 3, 4, 5 y 6. Se determina el coeficiente de transmisión del lado de los tubos.

8. Se prosigue con la carcasa y se supone, de manera tentativa, un espaciamiento de deflectores, utilizando un espaciamiento pequeño para una cantidad pequeña de fluido y un espaciamiento grande para una cantidad grande. De acuerdo con TEMA, estos espaciamientos pueden ser variados desde una quinta parte del diámetro de la carcasa hasta un diámetro de la misma, con objeto de satisfacer los requerimientos de transmisión de calor y caída de presión en la carcasa.

9. Se determina el coeficiente del lado de la carcasa.

10. Se calcula el coeficiente total, "limpio", y luego un coeficiente de diseño basado en factores apropiados de ensuciamiento.

11. Se determina el área requerida. Se compara ésta con el área superficial de la unidad seleccionada. La selección ideal es, por supuesto, la de la mínima área que produzca la transmisión de calor requerida. Si el cambiador seleccionado no satisface los requerimientos, es necesario suponer una unidad con mayor área superficial y repetir el procedimiento.

Estas etapas requieren tanteos en muchas partes del cálculo. Para el ingeniero novato o el que sólo ocasionalmente haga estimaciones de cambiadores de calor, el trabajo resultará bastante tedioso. Sin embargo, el cálculo frecuente de cambiadores de calor, y en especial el cálculo de cambiadores para servicios similares, permite al ingeniero desarrollar una técnica, o quizá una intuición, que elimina en alto grado el laborioso procedimiento de tanteos.

Métodos rápidos para el diseño de cambiadores de calor

De tiempo en tiempo han aparecido en la literatura, para el diseño de cambiadores de calor, muchos de los llamados métodos rápidos. Varios de dichos artículos presentan curvas o nomogramas para determinar los coeficientes de película. Hutchinson[11] ha compilado gráficas para la determinación de coeficientes de película,

para una gran variedad de compuestos. Además muchos artículos han presentado una serie de gráficas diseñadas para reducir el trabajo en los cálculos de cambiadores de calor. Sin embargo, desafortunadamente el usuario ocasional de tales gráficas encuentra que es tan difícil y tan tardado diseñar un cambiador utilizando dicha información, como siguiendo el método antes descrito.

Sieder[21] ha presentado varias tablas de transmisión de calor en forma de manual, lo cual permite una rápida estimación de coeficientes de película. Los datos figuran en forma tabular, con objeto de eliminar los errores que con tanta frecuencia se cometen al usar gráficas o nomogramas. La fuente de todos los datos se cita de manera clara, para que el lector pueda evaluar la información inteligentemente. Estas tablas se recomiendan en forma particular para aquellos ingenieros que, como los ingenieros de proyecto, sólo ocasionalmente necesitan verificar cotizaciones de cambiadores de calor.

El único método verdaderamente rápido para el diseño de cambiadores de calor es aquél en el cual el coficiente total se supone con base en experiencias previas, y a partir del mismo se calcula el área. Este método es válido para estimaciones y comparaciones rápidas de distintas cotizaciones de cambiadores de calor.

La selección de un coeficiente total con frecuencia puede ser hecha con un grado regular de exactitud, particularmente cuando se dispone de una buena información sobre la operación de cambiadores de calor en servicios similares. Sería conveniente que el ingeniero de proyecto mantuviese un registro de coeficientes típicos totales de transmisión para diversos servicios de cambiadores de calor.

Fair y Rase[8] han presentado una tabla de resistencias típicas para diversos fluidos representativos. Estos valores, que se dan en la Tabla 13-1, están basados en datos de operación y prácticas corrientes de diseño. Para obtener un coeficiente total estimado de diseño para un cambiador de carcasa y tubos, se procede de la siguiente manera:

1. Se leen los valores de las resistencias para los dos fluidos. Nótese que no se hace distinción alguna entre los lados de carcasa y de tubos.

2. Tomando el recíproco de la suma de esas dos resistencias se calcula el coeficiente total de diseño.

Otros tipos de cambiadores se estiman multiplicando el coeficiente total de diseño para el cambiador de carcasa y tubos por 0.25 para los cambiadores de superficie aumentada, y por 0.30 para los cambiadores de serpentín en caja. El método se recomienda para la mayoría de los cambiadores estándares. Los diseños poco usuales, los cambiadores muy grandes o muy pequeños, y los condensadores parciales no pueden ser estimados por este método.

TABLA 13-1. RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA CAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS*

Fluido	Líquido (sin cambio de fase)	Líquido hirviente	Vapor condensante
Líquidos aromáticos			
Benceno, tolueno, etilbenceno, estireno	0.007	0.011	0.007
Dowtherm**	0.007	....	....
Soluciones inorgánicas			
Salmuera de $CaCl_2$ (25%)	0.004	....	....
Acidos pesados	0.013	....	....
Salmuera de NaCl (20%)	0.0035	....	....
Diversas soluciones diluidas	0.005	....	....
Hidrocarburos líquidos ligeros			
C_3, C_4, C_5	0.004	0.007	0.004
Hidrocarburos clorados	0.004	0.009	0.007
Líquidos orgánicos diversos			
Acetona	0.007	....	....
Soluciones de aminas			
Dietanolamina y monoetanolamina saturadas (CO_2 y H_2S)	0.007	....	....
Soluciones pobres de aminas	0.005	....	....
Aceites			
Aceite crudo	0.015	....	....
Aceite diesel	0.011	....	....
Aceite combustible ("bunker" C)	0.018	....	....
Gasóleo			
Ligero	0.0125	....	0.015
Pesado (típico de alimentación a desintegrador catalítico)	0.014	....	0.018
Gasolina (400° EP)	0.008	0.010	0.008
Aceite de calentamiento (doméstico 30° API)	0.010	....	....
Formhidrato	0.006	....	....
Kerosina	0.009	....	0.013
Aceite lubricante	0.018	....	....
Naftas			
De absorción	0.008	0.010	0.006
Virgen, ligera	0.007	0.010	0.007
Catalítica, ligera	0.006	0.010	0.007
Pesada	0.008	0.011	0.0085
Polímeros (de C_8)	0.008	0.010	0.008
Crudo reducido	0.018	....	....
Lechada de aceite (desintegrador catalítico fluido)	0.015	....	....

* Reimpreso con autorización, *Petroleum Refiner*, 33, Núm. 7, 121 (1954).

** Mezcla eutéctica de éter fenílico y 26.5% de difenilo. Punto de fusión 12, punto de ebullición 258°C. Se usa para calentamiento, de manera similar que el vapor de agua. Permite controlar muy cuidadosamente las temperaturas. (N. del T.)

TABLA 13-1. RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA CAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS. (*Continuación*)

Fluido	Líquido (sin cambio de fase)	Líquido hirviente	Vapor condensante
Vapor de agua			0.001†
Agua			
Agua de calderas	0.003	....	....
De torre de enfriamiento (sin tratar)	0.007‡	....	....
De condensado (evaporado instantáneamente)	0.002	....	....
De río y pozo	0.007‡	....	....
De mar (limpia y a menos de 125°F)	0.004	....	....

† Las resistencias de condensación para el vapor pueden ser mucho mayores cuando hay vapores no condensables como sucede frecuentemente con el vapor de escape a baja presión.

‡ Cuando se tiene duda respecto a la calidad del agua, se sugiere un valor de 0.007.

Gases en flujo turbulento	Resistencia
Aire, CO, CO_2, y N_2	0.045
Hidrocarburos (de ligeros hasta naftas)	0.035

EVALUACION DE COTIZACIONES DE CAMBIADORES

Al evaluar cotizaciones de cambiadores de calor, primeramente se deben considerar los factores más obvios, tales como precio, tiempo de entrega, condiciones de pago y reputación del fabricante. Además, deben sujetarse a un cuidadoso escrutinio los importantes factores mecánicos y de diseño. Se debe hacer una tabulación con todas las cotizaciones para poder comparar los materiales de construcción, las diversas características de diseño, los espesores de la carcasa y de los tubos, las áreas superficiales y otras características especiales. Es posible que diseños para el mismo servicio por diferentes fabricantes muestren grandes variaciones en área superficial, con las correspondientes variaciones en precio. En tales casos es necesario que el ingeniero de proyecto estime, con fines comparativos, una área superficial para el proyecto en cuestión.

REFERENCIAS

1. Chilton, T. H., y R. P. Genereaux, *Trans. Am Inst. Chem. Engrs.*, 29, 161 (1933).
2. Colburn, A. P., *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 29, 174 (1933).
3. Colburn, A P. y T. P. Drew, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 33, 197 (1937).
4. DeLorenzo, B. y E. D. Anderson, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 67, 697 (1945).

5. Dittus, F. W. y L. M. K. Boelter, *Univ. of Calif. Pub. in Eng.*, 2, 443 (1930).
6. Donohue, D. A., *Ind. Eng. Chem.*, *39*, 62 (1947).
7. Donohue, D. A., *Ind. Eng. Chem.*, *41*, 62 (1949).
8. Fair, J. R. y Howard F. Rase, *Petroleum Refiner*, 33, No. 7, 121 (1954).
9. Gardner, K. A., *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, *67*, 621 (1945).
10. Grimison, E. D., *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, *59*, 583 (1937).
11. Hutchinson, F. W, *Industrial Heat Transfer*, The Industrial Press, New York, 1952.
12. Kern, D. Q., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
13. McAdams, W. H., *Heat Transmission*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1954.
14. Morris, F. H. y W. G. Whitman, *Ind. Eng. Chem.*, *20*, 234 (1928).
15. Murray, W. M., *J. Appl. Mechanics*, 5, A78 (1938).
16. Nusselt, W., *Mitt. Forsch. Arb. Ing.*, *89*, 1 (1910).
17. Nusselt, W., Z. *Ver. deut. Ing.*, *60*, 541, 569 (1916).
18. Oten, P. S., *Chem. Eng. Progr.*, *44*, 411 (1948).
19. Sakiadis, B. C. y J. Coates, Louisiana State University Eng. Exp. Station Bulletin No. 34, Baton Rouge, La., 1952.
20. Short, B. E., University of Texas Publication No. 4324, 1-55 (1943).
21. Sieder, E. N., *Heat Transfer Tables*, American Locomotive Co., New York, 1952.
22. Sieder, E. N. y G. E. Tate, *Ind. Eng. Chem.*, *28*, 1429 (1936).
23. *Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 3a. Ed., Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc., New York, 1952.

CAPITULO 14

BOMBAS PARA PROCESOS

Las plantas modernas de procesos no funcionarían si no fuera por las bombas mediante las que se mantiene un flujo estable de los fluidos a través de la planta, estableciéndose un proceso continuo. La selección inadecuada de las bombas crea serios problemas en la operación de una planta. Por lo tanto, el ingeniero de proyecto debe tener una cuidadosa supervisión en lo que respecta a selección, compra e instalación de las bombas.

Las bombas se fabrican en tamaño estándar. Lo fundamental para cada caso es seleccionar el tamaño y el tipo que más se ajuste a las necesidades de servicio requeridas. Por lo tanto, resulta de mucha utilidad el contacto que se tenga con los fabricantes de bombas, y a fin de obtener el beneficio máximo habrá que seguir las recomendaciones del mismo. También es esencial entender los principios fundamentales de operación de las bombas.

En este capítulo se analizan las bombas más comúnmente usadas en procesos industriales (centrífugas, de pistón y rotatorias), haciendo énfasis particular sobre la teoría y la información necesaria para lograr una adecuada selección de bombas. El no dar información de algunos tipos especiales de bombas no implica el no considerarlas. Efectivamente, ciertos servicios requieren de diseños muy especiales, siendo necesario para estos casos pedir recomendaciones a los representantes de los fabricantes.

BOMBAS DE PISTON

Aun cuando el uso de la acción alternativa para producir bombeos tuvo su origen hace 2 000 años, no fue sino hasta 1840 que

Henry R. Worthington inventó la bomba de pistón directo, accionada mediante vapor. Estas bombas se volvieron extremadamente populares, usándose además en los años en que empezó a utilizarse el motor eléctrico para su funcionamiento.

Aplicación

A principios del siglo XX, la bomba centrífuga empezó a desplazar el uso de la bomba de pistón. La descarga uniforme de la bomba centrífuga es muy ventajosa, especialmente en procesos industriales donde es una necesidad mantener operación con flujo estable. Las aplicaciones de las bombas centrífugas fueron limitadas por restricciones de su diseño en cuanto a capacidad y presión. Sin embargo, se han producido mejorías en su diseño, y gradualmente se han ido

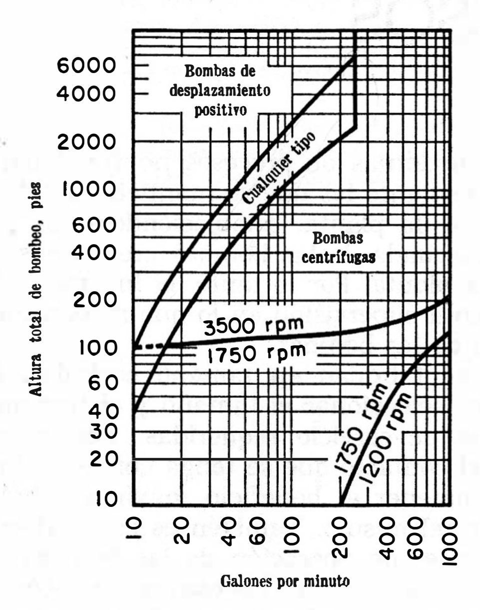


FIG. 14-1. Gráfica para selección de bombas. [Adaptada por R. L. Jacks, con permiso de *Chem. Eng. Progr.* *49*, 234 (1953).]

eliminando estas restricciones, de tal modo que en la actualidad sólo muy pocas aplicaciones se resuelven con bombas de pistón. Las bombas de pistón modernas se usan más adecuadamente para cargas altas y bajas capacidades. En la Fig. 14-1 se muestran los intervalos de utilización de diferentes tipos de bombas. Se ha encontrado que es muy ventajoso emplear bombas de pistón, propulsadas con vapor, para instalaciones temporales o para condiciones variables, o intermitentes, como las que se tienen en algunos tanques. En estas instalaciones, en las que no es una desventaja tener flujo inestable, se usa con mucha ventaja la rigidez, la flexibilidad y las característi-

cas económicas que estas bombas poseen. Con frecuencia se prefiere a las bombas de pistón para el bombeo de líquidos altamente volátiles (especialmente cuando se tienen condiciones de gasificación), pastas aguadas y líquidos viscosos.

Descripción

La siguiente tabulación es una lista abreviada de términos usados para clasificar las bombas de pistón. La mayoría de las bombas accionadas con vapor, usadas en procesos industriales, son de acción directa, doble o simple, de doble efecto o de simple efecto. Las bombas de doble efecto son las más usadas, excepto para servicios de alta presión en los que, por lo general, se emplean bombas de simple efecto (generalmente de tipo émbolo buzo o macizo).

Clasificación de las bombas de pistón

(Basada en la terminología del Hydraulic Institute)

I. Propulsión.
  A. Vapor.
    1. De acción directa; pistón del vapor conectado directamente al pistón del líquido a través del vástago del pistón.
    2. Manivela y volante; bomba con cigüeñal en el cual se instala el volante. Se usa en instalaciones grandes y para diferentes composiciones de arreglos.
    3. Sistemas de vapor.
      a. Simple; un cilindro con vapor de alta presión por cada uno de los cilindros del líquido.
      b. Compound en tándem; cilindro de alta y baja presión en la misma línea central.
      c. Sección compuesta; cilindro de alta y baja presión, lado a lado, con manivelas separadas 90°.
  B. Fuerza motriz; motor impulsado por cigüeñal.
II. Número de cilindros del líquido.
  Simple o simplex; uno.
  B. Doble; dos.
  C. Triplex; tres (sólo con motor eléctrico).
III. Extremos en el lado líquido.
  A. Pistón (Fig. 14-2); empaques en el pistón.
  B. Embolo buzo; el anillo del émbolo es estacionario; preferido para operaciones de alta presión debido a la facilidad de servicio y a la visibilidad del portaempaque.
    1. Extremos empacados (Fig. 14-3).
    2. Empacado en el centro (Fig. 14-4).
  C. De acción simple; una carrera de bombeo por revolución.
  D. De doble acción; dos carreras de bombeo por revolución.
IV. Arreglo de los cilindros.
  A. Vertical; por lo general para bombas con tres o más cilindros de líquido.
  B. Horizontal.

Las bombas de pistón se fabrican de tamaño estándar. En las Figs. 14-2, 14-3 y 14-4 se ilustran varios tipos de bombas, así como sus partes. A continuación se menciona un breve comentario de cada una de ellas.

Materiales de construcción

La siguiente descripción de los materiales más comúnmente usados fue proporcionada por la *Standards of the Hydraulic Institute*[9]*.

Aditamentos de bronce (Símbolo *BF*†) *a*). Bombas con aditamentos de bronce que constan de vástagos de pistones, de material bronce (excepto el extremo empacado del pistón); pistones de hierro en el lado del líquido; válvulas de bronce o de caucho en el lado del líquido; asientos de las válvulas en el lado del líquido, de hierro o de acero. *b*). Bombas de pistón en las que los cilindros del lado del agua tienen como aditamentos, casquillos o bujes de bronce. Para los modelos de bombas de émbolo buzo o macizo se incluyen, como aditamentos de bronce, los bujes para los collarines del prensaestopas del émbolo así como los cuellos.

La totalidad de los aditamentos de bronce (Símbolo *FBF*). Estas bombas constan de pistones, de material bronce (excepto el extremo empacado del émbolo macizo); pistones o émbolos macizos en el lado del líquido; resguardos y resortes; cilindros, en el lado del líquido, de hierro o de acero. Se proporcionan estas bombas con bujes o casquillos de bronce para los cilindros del lado del líquido. Las bombas de émbolo macizo tienen bujes de bronce adaptables al collarín del prensaestopas del pistón o émbolo, así como a los cuellos.

Resistente al ácido. (Símbolo *AR*). Todas las partes de la bomba que están en contacto con el líquido bombeado se construyen de materiales resistentes a la corrosión, de propiedades adecuadas a la aplicación específica de que se trate.

Todo de bronce. (Símbolo *AB*). Todas las partes de la bomba que están en contacto con el líquido bombeado se hacen de bronce.

Todo de hierro. (Símbolo *AI*). Todas las partes de la bomba que están en contacto con el líquido bombeado se hacen de metal ferroso.

Aditamentos estándar. Los fabricantes pueden emplear el término *estándar* o *aditamento regular* para designar al material empleado en las bombas, dentro de su producción regular.

Discusión de los tipos de bombas de pistón

Dobles vs. simples

Se prefiere la bomba doble ya que su característica de flujo es estable con respecto a la bomba simple. El diseño de la bomba doble permite que el pistón tenga carrera corta (con carrera larga puede ocasionar falla en la bomba). Esta característica aumenta el volumen del claro y es una desventaja para bombas de vacío húmedo o para servicios de bombeo de líquido altamente volátil. Bajo estas

* Reimpreso con permiso de *Standards of the Hydraulic Institute*, derechos de autor en 1955 por el Instituto de Hidráulica, 122 East 42nd St., Nueva York 17, N. Y.

† Los símbolos pertenecen a la denominación en inglés y se dan así por correspondencia con otros libros técnicos. (N. del T.)

condiciones, el no contar con desplazamiento máximo del pistón ocasionaría la acumulación de volúmenes excesivos de vapor en el cilindro. La bomba simple no tiene este defecto, por lo que es la más indicada para esta clase de servicio.

Pistón vs. pistón de buzo o émbolo de buzo o émbolo macizo

El pistón se diferencia del émbolo macizo por su forma y por el modo de empaque. En las Figs. 14-2 y 14-3 puede observarse que un pistón es una especie de disco plano, mientras que un émbolo macizo se asemeja a un cilindro largo. Además, las bombas tipo pistón llevan empaques sobre el mismo pistón para reducir las fugas de la descarga en el lado de la succión del pistón. Las bombas con émbolo macizo tienen empaques fijos en las cabezas del cilindro y se clasifican como empaque extremo o empaque central, de acuerdo con la localización del empaque. La bomba de émbolo macizo con empaque en el extremo no requiere de caja de empaque sobre el eje del pistón, mientras que esto es necesario para el caso de bombas con empaque central y para bombas de pistón (véanse las Figs. 14-3 y 14-4).

Para condiciones de servicio severo, tales como operación a presión alta, se prefiere a la bomba de émbolo macizo, aun cuando resulta ser más cara; esto debido a que el operador puede observar claramente las fugas que se tengan a través del empaque, así como también por lo fácil que resulta reemplazar o ajustar los empaques en estas bombas. Muchos clientes prefieren usar la bomba de émbolo macizo para presiones superiores a 400 lb/plg^2 especialmente si se tienen temperaturas elevadas. Casi siempre se escoge bomba de émbolo macizo para presiones superiores a 1 000 lb/plg^2, si la bomba de pistón es la indicada.

Partes de la bomba de pistón

(Véase la Fig. 14-2).

Cilindros

Por lo general, los cilindros en el lado del líquido son de hierro fundido, pero se construyen de hierro forjado cuando se tienen presiones y temperaturas elevadas; este último material se usa cuando se tienen presiones extremadamente altas.

El cilindro deberá diseñarse de acuerdo a la presión crítica, que es la presión a la que se equilibran las fuerzas que se tienen en el pistón del lado del líquido con las que se tienen en el pistón del lado del vapor.

Se usan camisas o casquillos en los cilindros cuando se tiene un excesivo desgaste o corrosión; se colocan atornillados o a presión. Casi todas las bombas que se usan en los procesos están equipadas

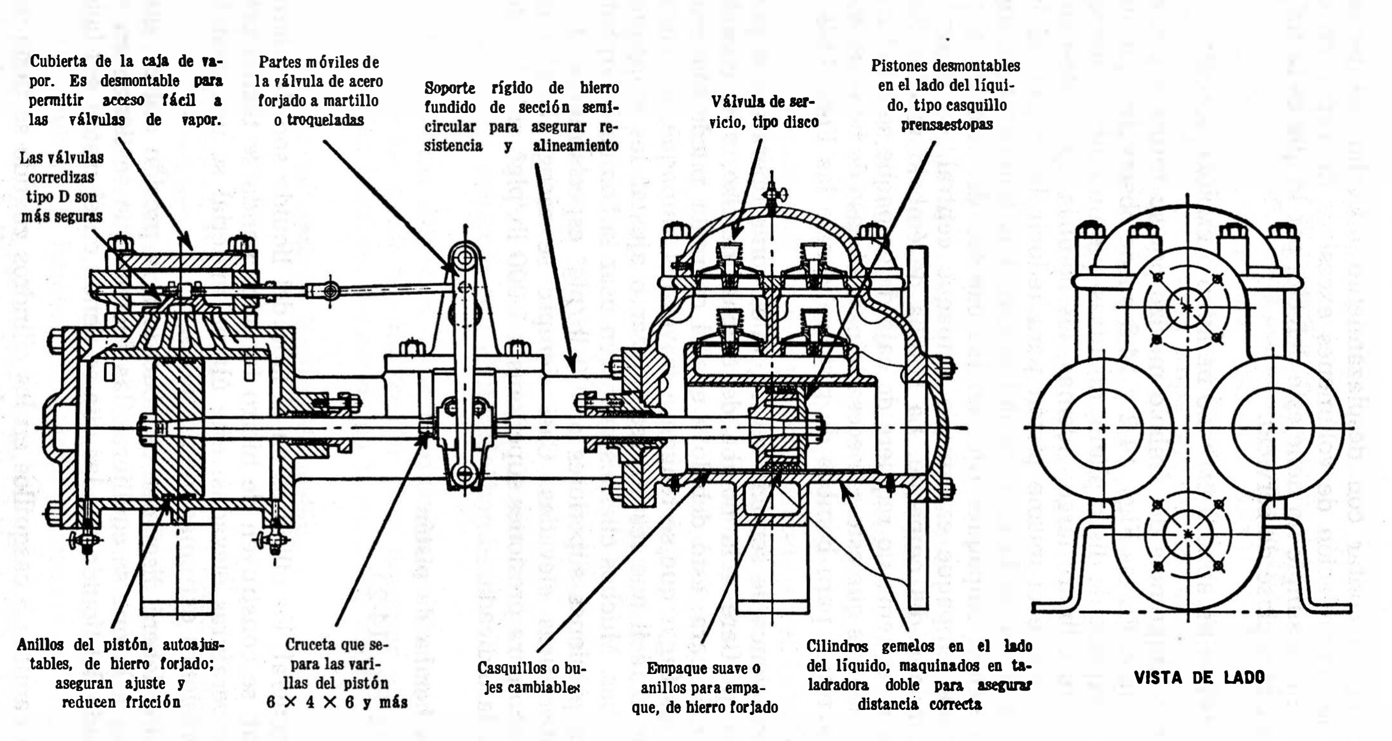


Fig. 14-2. Bomba horizontal con pistones gemelos. (Cortesia de Worthington Corporation.)

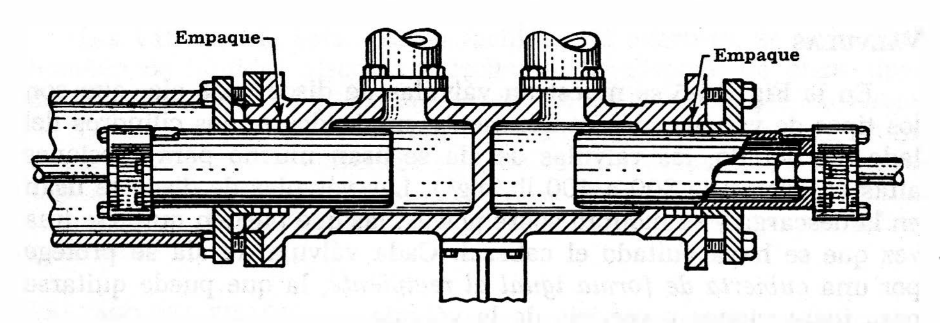


FIG. 14-3. Bomba de émbolo macizo mostrando empaques en los extremos.

con camisas en las que se usa una gran variedad de materiales, dependiendo ello del líquido y de las condiciones de bombeo. Se usan mucho aleaciones de acero al níquel-cromo en equipos de bombeo de aceite caliente.

Los cilindros en el lado de vapor, por lo general se construyen de hierro fundido, ya que la presión manométrica del vapor raras veces excede de 250 lb/plg².

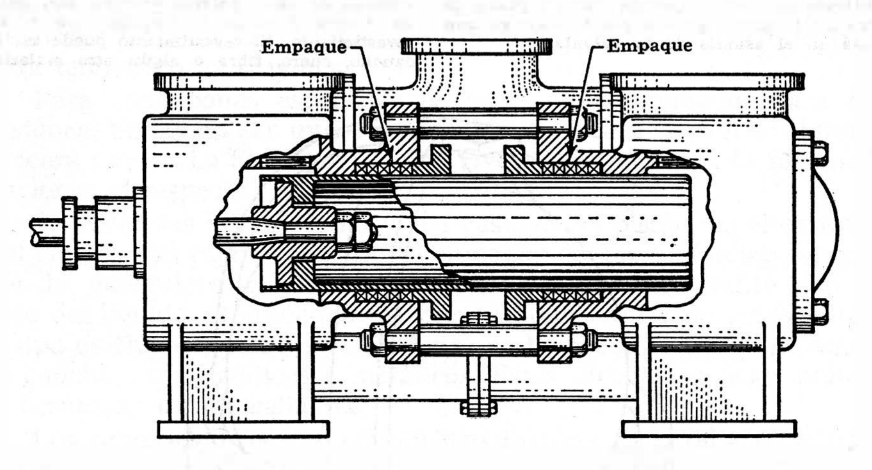


FIG. 14-4. Bomba de émbolo macizo mostrando empaques en el centro.

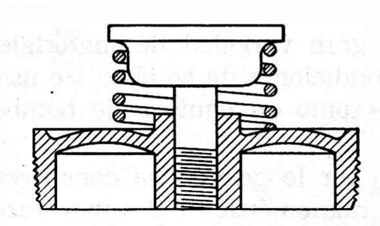
Las dimensiones de los cilindros y la longitud de la carrera se expresan en el siguiente orden: diámetro del cilindro del vapor, diámetro del cilindro del agua y longitud de la carrera.

EJEMPLO:

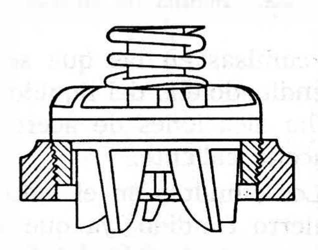
$10 \times 4\frac{1}{2} \times 10$
cilindros de vapor de 10 plg
cilindro del agua de 4½ plg
carrera de 10 plg

VÁLVULAS

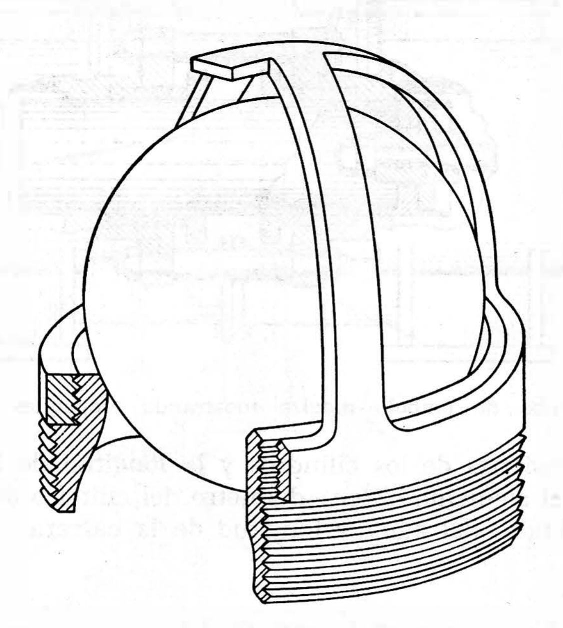
En la Fig. 14-5 se muestran válvulas de disco y de ala, que son los tipos de válvula más comúnmente empleados en los cilindros del lado del líquido; las válvulas de ala se usan mucho para presiones altas (mayores de 300 a 400 lb/plg²). Las válvulas de disco se usan en la descarga y se montan sobre placas, las que pueden quitarse una vez que se haya quitado el cabezal. Cada válvula de ala se protege por una *cubierta de forma igual al recipiente*, la que puede quitarse para inspecciones y servicio de la válvula.



Válvula de disco. **Válvula circular plana de caucho o metal, guiada por el vástago que está en el asiento de la válvula.**



Válvula de ala. **Válvula circular con guías de hierro fundido o forjado, con o sin revestimiento. El revestimiento puede ser de caucho, cuero, fibra o algún otro material.**



Válvula de bola. **Válvula esférica de caucho o de metal.**

FIG. 14-5. Tipos de válvulas para bombas de pistón. (Reimpreso de *Standards of the Hydraulic Institute*, derechos de autor, 1955, Hydraulic Institute, 122 E. 42nd St., New York 17, N. Y.)

Las válvulas de bola, por su facilidad de abertura, se usan para bombeo de líquidos viscosos y lechosos. Se dispone de otros tipos de válvulas según el problema específico de bombeo que se tenga.

La colocación de las válvulas en los cilindros de vapor es estándar. Las válvulas de corredera se conectan directamente, o bien operan a través de pistones auxiliares, o también se usan válvulas balanceadas. Estas últimas se prefieren cuando se usa vapor sobrecalentado.

VÁSTAGO DEL PISTÓN

Por lo general, los vástagos se hacen de acero de aleación, de alta dureza y de gran resistencia a la tensión; preferentemente se construyen de dos partes para que su desarmado sea más fácil.

EMPAQUES

A fin de que la bomba tenga funcionamiento satisfactorio, deben escogerse adecuadamente los empaques. Por lo general, los pistones de vapor son sellados con anillos de hierro forjado. Los pistones en el lado del líquido se sellan con anillos de bakelita si se tienen temperaturas menores de 250 a 350°F y se usan anillos de hierro forjado para temperaturas mayores.

Para condiciones especiales se usan otros empaques para los pistones, pudiendo ser una combinación de loneta y caucho, bronce y acero monel. La Standards of the Hydraulic Institute[9] da recomendaciones al respecto.

Se evitan las fugas a lo largo del vástago del pistón, en el extremo del cilindro del vapor, mediante el empaque del prensaestopas, el que, por lo general, está impregnado con asbestos de grafito. En el lado del líquido, el empaque del prensaestopas varía de acuerdo con el tipo de fluido y con las condiciones de bombeo. Se usan empaques de caucho, semimetálicos y metálicos. Estos últimos se usan cuando se bombean aceites calientes.

Los prensaestopas que operan con bombas que trabajan a temperatura elevada (arriba de 400°F) deberán enfriarse con agua. Las bombas que trabajan al alto vacio en el lado de la succión, o que bombean líquidos volátiles, deberán usar un anillo de cierre hidráulico para ajuste del prensaestopas.

CÁMARAS DE AIRE

Las bombas de pistón con cámara de aire producen un flujo estable. El aire que se comprime durante la carrera del pistón, se expande cuando éste va en sentido contrario por la salida del líquido hacia la línea de descarga. El volumen de estas cámaras debe ser de seis a ocho veces el desplazamiento en caso de bombas simples y de tres a cuatro veces en caso de bombas dobles o duplex.

BRIDAS

Las bridas en los cilindros de las bombas son fundidas y forman parte integral del cilindro; pueden ser bridas de cara plana o abultada. Debe tenerse cuidado de especificar correctamente la brida de acoplamiento a la brida de la bomba. Si la brida de la bomba es plana, la brida de acoplamiento debe ser plana. La deformación originada por el fuerte ajuste de las bridas puede ocasionar rayaduras de la carcasa. El Hydraulic Institute recomienda la especificación de juntas del tipo de ranura y lengüeta, cuando por las condiciones de presión y temperatura se requiere que la presión en el empaque sea mayor que la que se puede obtener al usar bridas de cara plana.

Dimensionado de las bombas de pistón

Capacidad teórica

La capacidad teórica de una bomba de pistón depende del desplazamiento del pistón del líquido o del émbolo buzo. La expresión para calcular la capacidad en galones por minuto es la siguiente:

$$G = 7.48 \frac{\pi D^2}{(4)(144)} PCF - Z$$

o

$$G = 0.0408\, D^2PCF - Z$$

donde G = gpm
D = diámetro del émbolo buzo o pistón, plg
P = velocidad del pistón, pies/min
C = número de cilindros
F = factor, 0.5 para bombas de acción simple, 1.0 para las de doble acción
Z = corrección debida al volumen ocupado por el vástago del pistón durante una carrera de pistón

El factor de corrección Z depende del diseño de la bomba. En casi todos los casos, el vástago del pistón se extiende hasta un extremo inferior de la bomba y se sujeta en un extremo del pistón. Para este diseño:

Para bombas de simple acción

$$Z = 0$$

Para bombas de doble acción

$$Z = 0.0204 d_r^2 PC$$

donde d_r = diámetro del vástago en pulgadas.

Para ciertos diseños no se tiene corrección, como para bombas de émbolo macizo con extremo empacado.

Capacidad real

Debido a las fugas que se tienen a través de los empaques del pistón, prensaestopas o válvulas, es prácticamente imposible llegar a desarrollar la capacidad teórica. El flujo teórico se ve también reducido por cantidades de aire o gas que se introducen a la bomba. En ingeniería, a la relación capacidad real entre capacidad teórica se le llama eficiencia volumétrica (E_v):

$$E_v = \frac{G_a}{G} \times 100$$

donde G_a = capacidad real
G = capacidad teórica

Deslizamiento

Otro término muy usado es el *deslizamiento.*

$$\text{Deslizamiento} = 1 - \frac{E_v}{100}$$

Por lo tanto,

$$\text{Deslizamiento} = \frac{G - G_a}{G} = \frac{\text{Fugas}}{\text{Desplazamiento teórico}}$$

Al suponerse que las fugas aumentan proporcionalmente con la velocidad, el deslizamiento aumentaría al disminuir la velocidad. Sin embargo, se tienen mayores incrementos de fugas a velocidades altas.

Por lo general, el deslizamiento es menor al 10% (0.10). Con frecuencia se considera un valor de 3% (97% de eficiencia volumétrica) para calcular los diámetros de los pistones para bombas que trabajan a velocidades normales. Sin embargo, con valor de 10% se tendría un diseño muy seguro.

Velocidades recomendadas en los pistones

El Instituto de Hidráulica,[9] basado en muchos años de experiencia, recomienda, en sus estándares, velocidades de diseño que producen desgaste mínimo en las bombas.

En la Tabla 14-1 se reportan velocidades comúnmente empleadas para valores de longitud y carrera de pistones en bombas simples y dobles. Aunque una bomba con carrera corta puede dar mayor número de revoluciones por minuto, en una de carrera larga la velocidad del pistón puede ser mayor. Los valores señalados son valores promedio basados en una gran variedad de bombas y condiciones. Siempre será preferible atender las recomendaciones del fabricante, si éstas se tienen a la disposición. Para bombas que trabajan a pre-

TABLA 14-1. VELOCIDADES RECOMENDADAS PARA PISTONES*

Bombas simples y duplex de acción directa, que usan vapor

Longitud de la carrera	Velocidad, pies/min
3	37
3½	42
4	46½
5	53
6	59
7	64
8	68
10	75
12	81½
14	87
15	89½
16	92
18	96½
20	100
24	106½
28	111½
36	120

Correcciones por viscosidad o temperatura

Viscosidad SSU	o	Temperatura °F	Multiplicar la velocidad básica por
250		70	1.00
1000		83	0.89
2000		105	0.80
3000		132	0.74
4000		165	0.69
5000		210	0.65
6000		260	0.62
7000		330	0.58
8000		415	0.55
9000		520	0.52
10,000		650	0.50

Nota: La corrección se efectúa ya sea por temperatura o por viscosidad, según lo que se esté controlando. Se interpola para valores intermedios.

* Adaptada con permiso de la *Standards of the Hydraulic Institute,* derechos de autor 1955, de Hydraulic Institute, 122 East, 42nd Street, Nueva York 17, N. Y.

siones manométricas mayores de 300 lb/plg² es deseable reducir la velocidad hasta 0.8 del valor normal, con objeto de reducir riesgos por choque o impacto.

Potencia caballos agua (potencia caballos líquido)

Los caballos de potencia agua, o líquido, corresponden a la potencia que se tiene a la salida de la bomba y se calculan del mismo

modo para todos los tipos de bombas. Básicamente, los cálculos se originan a partir de la ecuación general de la energía, aplicada adecuadamente según un balance de energía entre la succión y la descarga de la bomba. Por lo general, se desprecian los efectos estático y cinético; el trabajo hecho por la bomba es:

$$W = \frac{(P_D - P_s)144}{\rho}(G_a)\left(\frac{1}{7.48}\right)(\rho)\left(\frac{1}{33{,}000}\right)$$

$$= \frac{(P_D - P_s)(G_a)}{1715}$$

donde P_D = presión absoluta en la descarga, lb/plg²
P_s = presión absoluta en la succión, lb/plg²
W = potencia, hp (caballos)
G_a = galones por minuto realmente bombeados
ρ = peso específico, lb/pie³

En la eficiencia mecánica se incluyen los efectos de fricción causada por pérdidas a la entrada y salida y dentro de la bomba.

Eficiencia mecánica

El término eficiencia mecánica E_m se define por la relación trabajo del líquido a la salida, dividido entre el trabajo suministrado a la entrada de la bomba y, por lo general, representa la eficiencia total incluyendo las pérdidas hidráulicas y mecánicas. Las pérdidas volumétricas son evaluadas en el cálculo de G_a.

Para bombas accionadas con vapor

$$E_m = \frac{\text{WHP}}{\text{IHP}}$$

Para bombas accionadas con motor

$$E_m = \frac{\text{WHP}}{\text{BHP}}$$

donde WHP = caballos agua
IHP = caballos indicados
BHP = caballos al freno

En la Tabla 14-2, Jacks[5] reporta valores típicos de eficiencias mecánicas E_m para bombas de pistón.

Relación entre las presiones en los cilindros de vapor y agua

La fuerza ejercida por el cilindro de vapor es

$$F_s = (\text{MEP})\left(\frac{\pi D_s^2}{4}\right)$$

TABLA 14-2. EFICIENCIAS MECANICAS PARA BOMBAS DE PISTON ACCIONADAS CON VAPOR*

	Eficiencia mecánica		
	Para diferencial de presión 300 lb/plg²		Para diferencial de presión mayor de 300 lb/plg²
Carrera	Pistón	Embolo buzo	Embolo buzo
3	55	50	41
4	60	55	44
6	65	60	51
8	68	65	54
10	72	68	57
12	74	70	59
16	76	73	63
18	78	75	65
20	79	77	66
24	80	78	67

* Reimpresa con permiso de R. L. Jacks, *Chem. Eng. Progr.*, 49, 234 (1953).

donde D_s = diámetro del cilindro del vapor, plg
MEP = presión media efectiva obtenida de la gráfica del diagrama indicador en lb/plg²

La bomba más usada en proceso es la que tiene un cilindro de vapor por cada cilindro de agua. En este tipo de bomba se ejerce la presión máxima durante la carrera completa del pistón; por lo tanto, la gráfica del diagrama indicador es un rectángulo. La presión media efectiva es simplemente la altura de este rectángulo, la que es igual a la presión del vapor que llega a la bomba menos la contrapresión (presión en la descarga o presión que tiene el vapor a la salida de la bomba). Al no conocer el valor de contrapresión, puede suponerse un valor de 16 lb/plg² absolutas.

Los valores de la MEP para varias máquinas accionadas con vapor pueden, aproximadamente, obtenerse por:[8]

Tipo	Fórmula
Cilindro simple	$MEP = P - b$
Compound	$MEP = 2P - \frac{P}{R} - bR$
Triple expansión	$MEP = 3P - 2\frac{P}{R_1^{1/2}} - bR_1$

donde P = presión absoluta del vapor que llega a la bomba, lb/plg²
b = contrapresión absoluta, lb/plg²

$$R = \frac{\text{presión media en el área del cilindro}}{\text{presión máxima en el área del cilindro}}$$

$$R_1 = \frac{\text{presión mínima en el área del cilindro}}{\text{presión máxima en el área del cilindro}}$$

Se recomiendan los siguientes valores de b cuando no se conoce el valor de la contrapresión:

Simple	16 lb/plg² abs
Compound	6 lb/plg² abs
Triple expansión	5 lb/plg² abs

De manera análoga, la fuerza ejercida en el cilindro del líquido, dado que es un solo cilindro, será:

$$F_w = (P_D - P_s)\left(\frac{\pi D_w{}^2}{4}\right)$$

donde P_D = presión absoluta en la descarga, lb/plg²
P_s = presión absoluta en la succión, lb/plg²
D_w = diámetro del cilindro del líquido, plg

Debido a efectos de la fricción mecánica, la fuerza que se ejerce en el cilindro del agua es menor que la que se ejerce en el cilindro del vapor. La relación entre estas dos fuerzas es igual a la eficiencia mecánica.

$$(F_s)\left(\frac{E_m}{100}\right) = F_w$$

o

$$(\text{MEP})\left(\frac{\pi D_s{}^2}{4}\right)\left(\frac{E_m}{100}\right) = (P_D - P_s)\left(\frac{\pi D_w{}^2}{4}\right)$$

Entonces

$$P_D - P_s = \left(\frac{D_s}{D_w}\right)^2 (\text{MEP})\left(\frac{E_m}{100}\right)$$

Puede usarse esta ecuación para calcular el diámetro del cilindro del vapor cuando se conocen los valores de las presiones y el diámetro del cilindro del agua. Se podrá calcular también la presión máxima P_D que una bomba puede producir para cualquier presión de vapor conocida. Kent[6] recomienda que se use para los cálculos anteriores el 90% de los valores usuales de la eficiencia mecánica.

Bombas de volumen controlado

Un grupo muy importante de bombas usadas en las industrias de procesos es el de la bomba de volumen controlado (Fig. 14-6), la que es usada ampliamente para alimentar de manera muy exacta los flujos necesarios de un proceso y para proporcionar flujos de varias corrientes a reactores y a tanques de tratamientos o mezcladores. Estas bombas no solamente actúan como tal sino también como aparatos medidores del volumen del flujo bombeado. Son

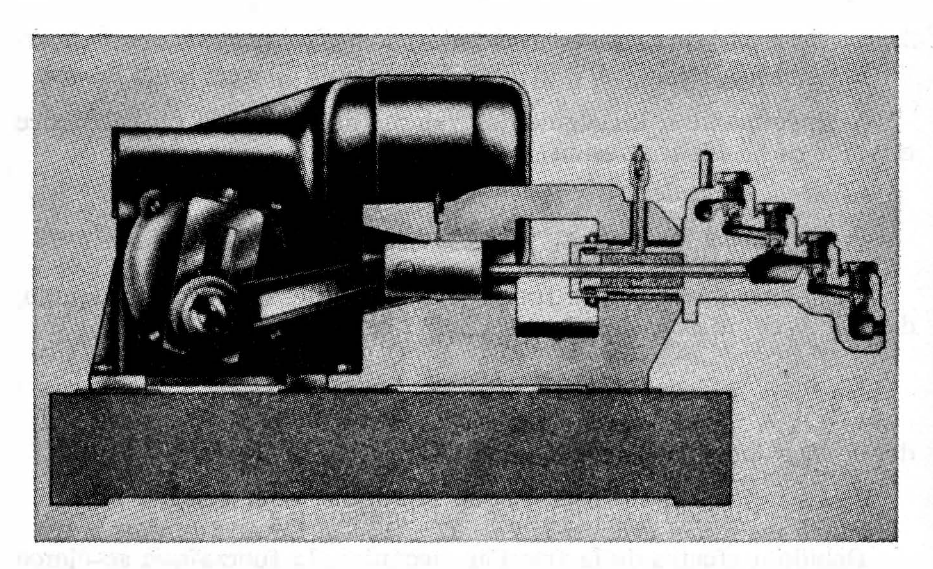


Fig. 14-6. Bomba de volumen controlado. (Cortesía de Milton Roy Company.)

bombas de pistón del tipo de émbolo macizo, con válvulas tipo bola tanto en la succión como en la descarga. Estas unidades están diseñadas para producir en la descarga, presiones manométricas de valor hasta de 25 000 lb/plg². Se pueden obtener diseños de bombas simples y duplex. Se tienen bombas duplex especiales, las que producen flujo constante sin pulsaciones. Esto se obtiene porque uno de los émbolos se desacelera en la misma proporción que el otro se acelera.

Las unidades están equipadas con reductores de velocidad variable y con micrómetros para efectuar los ajustes exactos en la variación de la velocidad del pistón y, por lo tanto, del flujo bombeado. La velocidad máxima de seguridad de estas bombas excede al valor de la recomendada para bombas de pistón, aunque se recomiendan velocidades bajas para bombeo de gases licuados.

Las bombas de volumen controlado pueden obtenerse con motor eléctrico o con motor neumático. Con frecuencia se usa motor neumático en lugares peligrosos y su uso se prefiere en lugar del motor eléctrico a prueba de explosión, el cual es más caro.

Estas bombas se usan bastante para bombeo de productos químicos; se construyen de varios metales de acuerdo con los servicios requeridos. Entre los materiales se incluyen hierros fundidos y aceros, así como también aleaciones resistentes a la corrosión y plásticos.

Otras bombas de pistón

Para ciertos procesos industriales se necesita de diseños especiales de bombas de pistón. Se requiere de diseños únicos para poder

usar materiales resistentes a la corrosión tales como porcelana y caucho. Uno de los diseños especiales más utilizados es la bomba de diafragma (véase la Fig. 14-7). El émbolo macizo de esta bomba está sujeto a un diafragma flexible de caucho, el cual es el único material que hace contacto con el fluido que se está bombeando. El movimiento hacia arriba y hacia abajo del diafragma produce la acción de bombeo. Estas bombas son apropiadas para dar movimiento a fluidos muy espesos tales como sedimento o lodo.

BOMBAS CENTRIFUGAS

El desarrollo de la bomba centrífuga ha sido extraordinario; actualmente se le usa para cualquier tipo de servicio. Casi todos los fabricantes producen bombas centrífugas de capacidades desde 5 gpm y diferencial de presiones de 2 a 5 lb/plg² hasta bombas de pasos múltiples de 2 800 a 3 000 gpm y presión manométrica en la descarga de 3 000 lb/plg². Se tienen diseños que manejan fluidos hasta de 850°F altamente volátiles y lechosos.

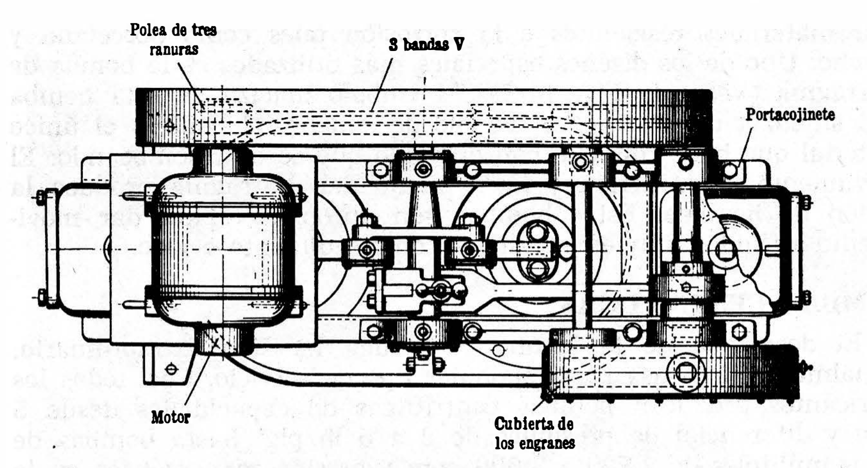
Bombas especiales han sido diseñadas para condiciones de operación muy impresionantes. Las bombas en el acueducto del río Colorado bombean 90 000 gpm a 444 pies de altura y las del Grand Coulee Irrigation Project 607 000 gpm a 310 pies de altura. Se tienen instalaciones especiales de bombas centrífugas colocadas en serie, diseñadas para presiones superiores a 5 000 lb/plg².

Clasificación de las bombas centrífugas

Igual que para otros campos, existe confusión en el campo de las bombas centrífugas; esto es debido a la nomenclatura engañosa. Originalmente, una bomba centrífuga era una bomba que producía su acción de bombeo mediante fuerza centrífuga. Sin embargo, se han tenido muchos progresos en el diseño de los rodetes, en los que una parte o ninguna de la acción de bombeo es producida por fuerza centrífuga. Sin embargo, todas estas bombas están clasificadas como bombas centrífugas ya que se tiene mucha relación básica entre ellas.

En el sentido más amplio, una bomba centrífuga consiste en un rodete que produce una carga de presión por la rotación del mismo dentro de una cubierta. Las diferentes clases de bombas se definen de acuerdo con el diseño del rodete, el que puede ser para flujo radial o axial. La clasificación que se proporciona más abajo es de acuerdo con las sugerencias del Instituto de Hidráulica (véase la Fig. 14-8).

1. *Tipo radial.* Este rodete envía, por fuerza centrífuga, el flujo del fluido en dirección radial hacia la periferia de aquél. La carga de velocidad es convertida a carga de presión en la descarga de la bomba. Por lo general, las aletas de estos rodetes están curvadas hacia atrás y tienen curvatura simple. El rodete radial ha sido el tipo más comúnmente usado en las plantas de proceso.



PLANTA

Carátula indicadora de la carrera
Bandas V
Protector de bandas
Motor
Biela
Marco para soporte de la bomba
Tornillo de ajuste
Vástago del émbolo buzo
Barra de ajuste
Diafragma del anillo del émbolo de buzo
Asiento de la válvula renovable
Descarga
Diafragma
Diafragma del anillo retenedor
Válvula de bola
Diafragma del émbolo de buzo
Asiento de la válvula renovable
Tubo de succión
Tubo de succión

ALZADA EN CORTE

FIG. 14-7. Bomba de diafragma. Bomba Dorrco tipo V. (Cortesía de Dorr Company Engineers.)

Velocidad específica: 500 a 3 000, succión simple
hasta 6 000, succión doble

2. *Flujo mixto.* La carga se desarrolla con un rodete delgado, en parte por fuerza centrífuga y en parte por el empuje de las aletas. Esto se consigue construyendo aletas de curva doble o en forma de hélice, de tal manera que la descarga es una combinación de flujo axial y radial.

Velocidad específica: 4 500 a 9 000

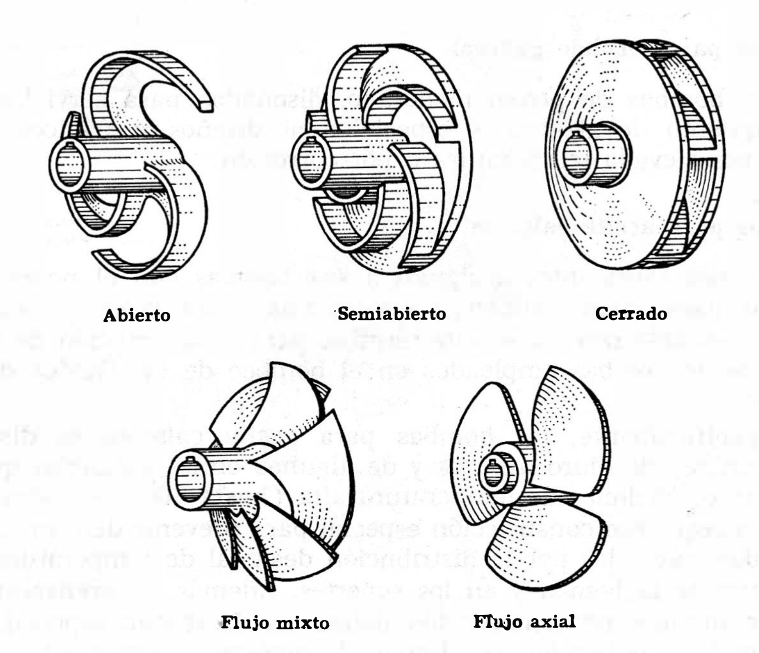


FIG. 14-8. Tipos de rodetes. (Los tres rodetes de la parte superior son radiales.)

El rodete tipo Francis es un tipo intermedio entre el de flujo mixto y el radial. La entrada del flujo es axial y la salida es radial.

Velocidad específica: 1 500 a 4 500.

3. *Flujo axial o tipo hélice.* Casi toda la carga producida por este rodete es debida a la acción impelente de las aletas. El fluido entra y sale del rodete en dirección axial o casi axial.

Velocidad específica: 9 000.

Los cambios de las características de rodetes tipo radial con respecto a los de tipo axial son, respectivamente, de carga grande y flujo moderado a flujo extremadamente grande y carga baja.

Descripción de los tipos de bombas y de sus partes

En varias de las siguientes ilustraciones se muestran las bombas centrífugas y se identifican las partes de las mismas. La discusión,

fundamentalmente, se refiere a diseño de bombas con rodete radial por ser éste el más comúnmente usado en procesos.

Debido a necesidades muy singulares que se tienen en algunos procesos, donde con frecuencia se necesitan fluidos de alta presión y temperatura para determinadas condiciones de corrosión, se han creado diseños específicos de bombas, llamadas bombas para procesos. Estas se dividen en tres grupos especiales: para servicio general, para aceite caliente y para sustancias químicas.

Bombas para servicio general

Son bombas de precio moderado, diseñadas para servicios que no requieren de aleaciones especiales ni diseños mecánicos especiales por elevada temperatura o por corrosión.

Bombas para aceite caliente

Algunos fabricantes designan a sus bombas con el nombre de bombas para aceite caliente, como bombas para procesos, aunque parece deseable reservarse este término para la descripción de todos los tipos de bombas empleados en el bombeo de los fluidos de un proceso.

Específicamente, las bombas para aceite caliente se diseñan para bombeo de hidrocarburos y de algunas otras sustancias químicas bajo condiciones de temperatura alta (hasta 800°F). Estas condiciones requieren construcción especial para prevenir deformaciones indebidas, causadas por la distribución desigual de temperaturas en el cuerpo de la bomba y en los soportes. Además, el prensaestopas y los materiales de construcción deben ser de diseño especial. Por lo general, estas bombas se diseñan de manera que se pueda quitar por completo al elemento de rotación (ensamble formado por soporte de cojinete, eje y rotor) sin desconectar tuberías, cubierta de la bomba y motor. Se utiliza acoplamiento flexible (Fig. 14-9) de modo que se pueda desatornillar la cubierta de la bomba para después sacar el rodete y el ensamble de donde está el cojinete, como si fuera una sola unidad. Todo lo anterior hace posible llevar dicha unidad al taller para su futura reparación.

Bombas para sustancias químicas

Las bombas de esta categoría se construyen con materiales resistentes a la corrosión tales como aceros aleados, aceros revestidos de caucho o plástico, vidrio o barro. El diseño mecánico de estas bombas es único, debido a las propiedades poco comunes y al alto precio de estos materiales; por lo mismo deben buscarse diseños simples a fin de evitar el uso de aleaciones muy caras.

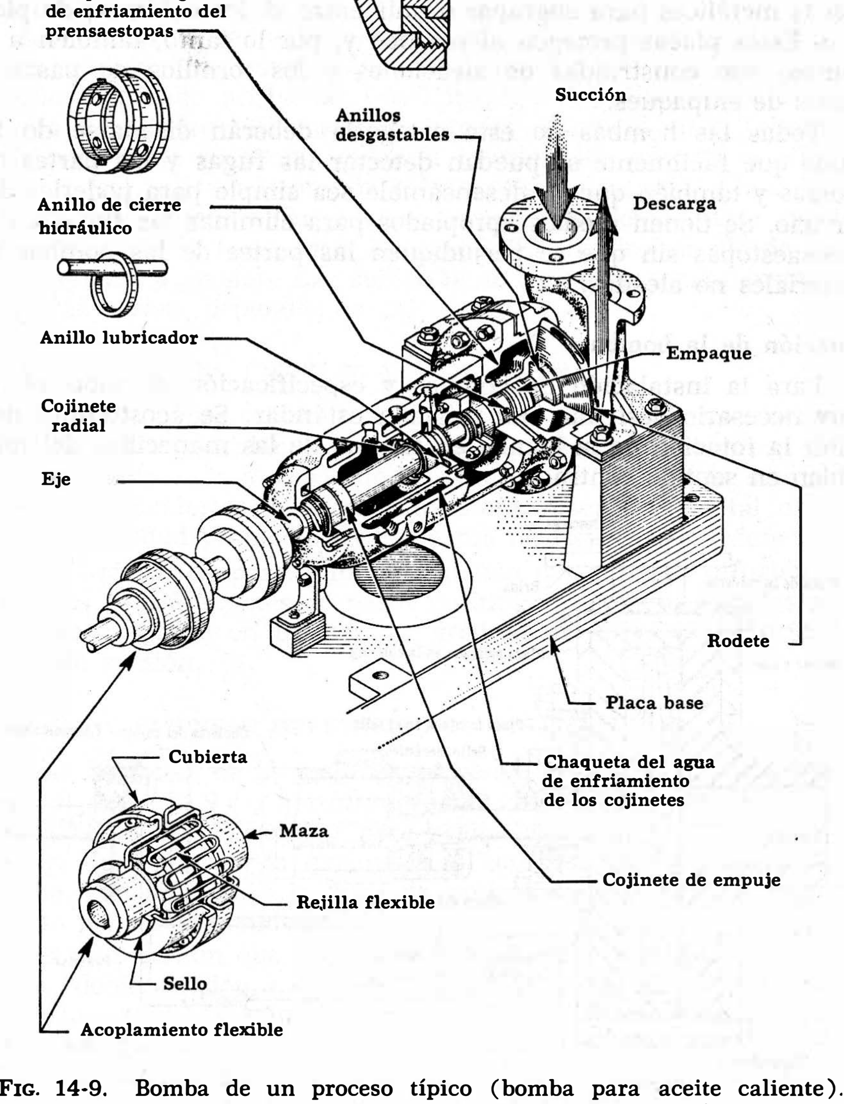


FIG. 14-9. Bomba de un proceso típico (bomba para aceite caliente).

Con frecuencia, el fundido de ciertas aleaciones de acero es un problema difícil. Para evitar deformaciones y contracciones que causan porosidad en los vaciados, deben eliminarse los cubos de las ruedas y agujeros con rosca, pudiendo unirse mediante abrazaderas las partes correspondientes. Este tipo de arreglo tiene la ventaja de eliminar el paso de tornillos a través de agujeros y empaques en donde pueda ocurrir la corrosión sin ser notada.

En la Fig. 14-10 se muestra una bomba típica para bombeo de sustancias químicas, con cubiertas de material plástico. Se utilizan placas metálicas para engrapar o unir entre sí dos cubiertas de plástico. Estas placas protegen al plástico y, por lo tanto, también a la bomba; son construidas de aleaciones y los tornillos no pasan a través de empaques.

Todas las bombas de esta categoría deberán diseñarse de tal modo que fácilmente se puedan detectar las fugas y las partes corroídas y también que su desensamble sea simple para poderles dar servicio. Se tienen medios apropiados para eliminar las fugas en el prensaestopas sin que se perjudiquen las partes de las bombas de materiales no aleados.

Rotación de la bomba

Para la instalación de bombas y especificación de motores, es muy necesario designar una rotación estándar. Se acostumbra describir la rotación de la bomba en sentido de las manecillas del reloj o bien en sentido contrario.

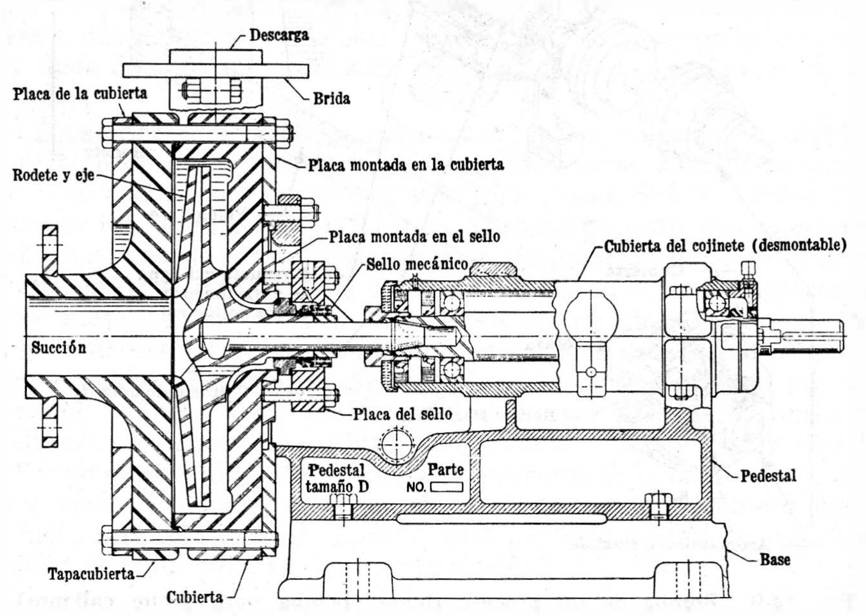


FIG. 14-10. Bomba para sustancias químicas con cubierta de plástico. (Cortesía de Mission Pump Company.)

Cubiertas de las bombas

MATERIALES DE LA CUBIERTA

El tipo de servicio determinará los materiales que deben emplearse en la cubierta de una bomba centrífuga. Las cubiertas de

bombas para servicio general, que operan con líquido frío, se hacen de hierro fundido y de semiacero para temperaturas de 300 a 450°F; se usan cubiertas de bronce para bombas de bronce.

Las cubiertas de las bombas para aceite caliente se hacen de acero fundido. Sin embargo, para bombas de pasos múltiples de alta presión, operando arriba de 1 500 lb/plg^2, se utiliza acero forjado "forma de cilindro". El ensamble interior se ajusta en el cilindro y cada paso tiene su propia cubierta interior. La cubierta o cilindro exterior está sujeta a la presión máxima de la descarga, y la cubierta interior está sujeta a fuerzas de compresión debido a la presión diferencial que se tiene entre los pasos. "El cilindro" se diseña como un recipiente a presión. Las cubiertas de las bombas para sustancias químicas varían, dependiendo del servicio.

Cubiertas voluta, circular y de difusión

Aunque muchos fabricantes de bombas de un solo paso sostienen que la cubierta circular tiene muchas ventajas en el bombeo de líquidos abrasivos, la mayoría de las bombas de un solo paso se construyen con cubiertas de forma de voluta, diseñadas de tal manera que la velocidad promedio es la misma en todas las secciones.

Las bombas de pasos múltiples tienen cubiertas de difusión. Los difusores (véase rodetes de pasos múltiples) están localizados entre los pasos y producen un cambio gradual de carga de velocidad a carga de presión.

Cubiertas divididas horizontal o verticalmente

Las cubiertas de las bombas se hacen en forma dividida ya sea vertical (Fig. 14-9) u horizontalmente (Fig. 14-11). Por lo general, las cubiertas de las bombas para aceite caliente se dividen verticalmente. Esto permite la expansión o contracción del soporte de la bomba, con respecto a la línea de centros del eje, sin que se tenga peligro por desalineamiento.

Es muy común que las bombas con rodetes montados entre cojinetes (doble succión o de pasos múltiples de presión baja), tengan cubiertas divididas a lo largo de la línea de centros horizontal. En caso de reparación puede quitarse la mitad superior de la cubierta sin necesidad de quitar tuberías ya que las toberas de la succión y de la descarga están localizadas por la parte inferior.

Colocación de las toberas en la succión y en la descarga

Aunque las bombas para servicio general, y para bombeo de sustancias químicas, ordinariamente succionan por el centro y descargan por arriba, es posible ordenarlas con las toberas de descarga localizadas a 45° y 90° respecto a la horizontal y en cualquiera de los cuatro cuadrantes.

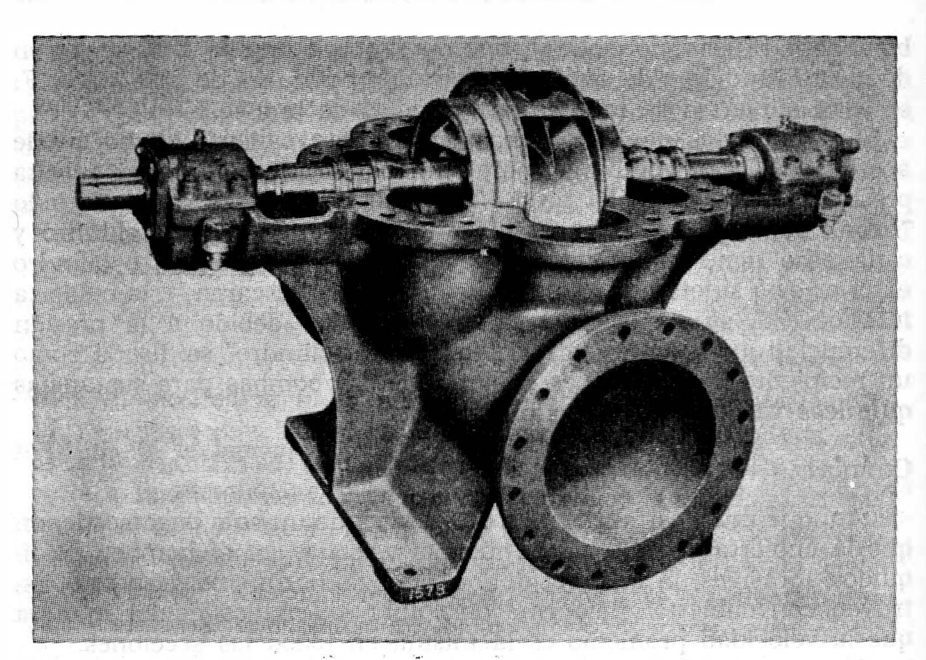


FIG. 14-11. Bomba centrífuga de doble acción. (Cortesía de Pacific Pump Company.)

Además de succionar por el centro y descargar por arriba, se producen diseños de bombas para aceite caliente que succionan y descargan por arriba. Este último diseño es de los más usados. Tanto las toberas de succión, como las de descarga, están muy bien soportadas en un pedestal y la cubierta de la bomba no está sujeta a esfuerzos originados por la expansión del tubo. En los diseños en que la succión es por el centro, la tubería de succión que llega a la bomba debe soportarse adecuadamente a fin de prevenir esfuerzos indebidos en la cubierta y posible rompimiento de la misma. Las bombas con succión y descarga por arriba eliminan la necesidad de respiraderos, con lo que se simplifica la instalación de la tubería.

MONTAJE DE LA CUBIERTA

La cubierta de la bomba puede ser íntegramente fundida con soportes rígidos o marcos tipo de caja con agujeros para el paso de los tornillos del montaje. Muchas bombas, sobre todo las que operan a más de 500°F, se soportan sobre pedestales (forma de silla de montar) en o cerca de la línea central de la bomba. Como se mencionó anteriormente, la bomba para aceite caliente con cubierta dividida verticalmente (Fig. 14-9) tiene soporte de este tipo en la línea central horizontal, permitiendo la libre expansión y contracción sin perjudicar el alineamiento.

Muchos fabricantes producen pedestales enfriados por agua, para usarse en bombas que trabajan a más de 500°F. Stepanoff[10] advierte que puede ser perjudicial, en vez de benéfico, el enfriamiento por agua en unidades movidas por turbina, debido a que en ciertos casos no se tiene enfriamiento en el montaje de la turbina y puede tenerse igual temperatura que la que se tiene en el pedestal. En este caso se podrán tener desalineamientos si los pedestales de la bomba fueran enfriados con agua.

Bombas de succión simple y succión doble

Aunque las bombas de succión doble pueden construirse con cubierta dividida verticalmente, de tal manera que ésta pueda soportarse en la línea del centro del eje, esta disposición no resulta adecuada para darle servicio a la bomba. Prácticamente todas las bombas de succión doble tienen cubierta dividida horizontalmente. De aquí se concluye que, por lo general, las bombas para aceite caliente son de succión simple.

Esencialmente un rodete de succión doble (Fig. 14-11) se asemeja a dos rodetes de succión simple que se tocan espalda con espalda. El líquido se introduce por ambos lados del rodete. En el rodete de succión doble, el empuje axial es cero porque las presiones de succión y de descarga actúan en ambos lados del rodete. No obstante esto, en estas bombas se usa un cojinete pequeño de empuje axial. En la bomba de succión simple, la succión y la presión de descarga actúan en el frente, y en la parte trasera sólo actúa la presión de descarga, de tal modo que se origina una fuerza axial externa la que requiere de un cojinete de gran empuje axial. Algunas bombas de succión simple se construyen con agujero balanceado en el rodete, con objeto de admitir presión de succión en el lado de atrás del rodete, obteniéndose de esta manera un sistema más balanceado. De cualquier manera, el cojinete se selecciona para resistir la carga axial máxima esperada. Para bombas de gran tamaño que trabajan a temperatura moderada, la bomba de succión doble ofrece más ventajas que la de succión simple; esto debido al alto costo de los cojinetes axiales.

Tipos de rodetes radiales

Los rodetes son fundidos en una sola pieza y son hechos de hierro fundido, bronce, aleaciones tales como 11–13% acero al cromo, o de algún otro material apropiado para el líquido bombeado. El rodete se asegura al eje mediante una cuña.

En la Fig. 14-8 se muestran varios tipos de rodetes radiales. Estos son cerrados, semicerrados o semiabiertos y abiertos. En bombas para aceite caliente comúnmente se emplea el rodete cerrado; éste también es de uso muy común para todos los tipos de bombas que manejan

líquidos claros. Los rodetes de este tipo tienen aros de refuerzo los que encierran totalmente las aletas, con excepción de la parte que se tiene en la periferia y en la succión. Los rodetes cerrados tienen por objeto proporcionar un mayor contacto entre el rodete y la cubierta para minimizar las fugas de la descarga a la succión.

Los rodetes semiabiertos tienen solamente una pared o aro de refuerzo en la parte trasera. Los rodetes abiertos no tienen aros de refuerzo, pero tienen nervaduras o aros parciales para proporcionar la resistencia mecánica, sobre todo para los rodetes de tamaño grande.

Los rodetes abiertos y semiabiertos son los más indicados para bombear líquidos que contengan sólidos en suspensión o líquidos viscosos. Estos rodetes pueden limpiarse muy fácilmente y operan con un mínimo de obstrucciones. Los rodetes abiertos requieren de vaciados más simples y tienen el mínimo de metal, por lo mismo son de más bajo costo; esto es una ventaja, particularmente cuando se requiere de aleaciones especiales para la construcción de bombas para sustancias químicas.

Las fugas en los rodetes abiertos y semiabiertos se aumentan con el desgaste; por lo tanto, la eficiencia de estos rodetes no es mayor que la de los rodetes cerrados. Sin embargo, inicialmente, la eficiencia de los rodetes abiertos y semiabiertos se mejora mucho debido a la reducción de fricción en los discos.

Aunque los rodetes semicerrados y abiertos son baratos en la fabricación, no se puede afirmar que para el mismo servicio la bomba con rodete semicerrado sea más barata que la bomba con rodete cerrado. Realmente, las bombas para aceite caliente con rodetes semicerrados son más caras que las bombas con rodetes cerrados. Esto se debe a la dificultad mecánica de dejar los claros apropiados entre el rodete y la cubierta a fin de reducir las pérdidas y mantener la eficiencia.

Anillos desgastables

Casi todas las bombas de rodete cerrado (aceite caliente, etc.) se proporcionan con anillos desgastables que son como los ilustrados en la Fig. 14-9. Al haber desgaste en la bomba, se incrementa el claro entre el rodete y la cubierta, y deben instalarse nuevos anillos, a fin de restaurar las condiciones normales de operación de la bomba.

La mayoría de las bombas para aceite caliente tienen anillos tanto en la cubierta como en el rodete. Algunas se fabrican solamente con anillos en la cubierta, pero los cubos del rodete están sobrados y el diseño es tal que podrán instalarse anillos en el rodete cuando se tenga desgaste en el cubo. Las bombas para servicio general con rodete cerrado, por lo general están equipadas con anillos solamente en la cubierta, aunque algunos diseños no se fabrican con anillos desgastables.

Para bombas muy grandes es una desventaja no tener anillos desgastables, ya que el costo del rodete es muy grande comparado con el costo de los anillos. Algunas bombas para sustancias químicas no utilizan anillos desgastables por el problema mecánico que representa su construcción con aleaciones especiales. Sin embargo, debe tenerse mucho cuidado en su diseño y construcción para proporcionar superficies desgastables horizontales en cada lado del rodete.

Debido a que los claros entre las superficies desgastables son muy pequeños (0.010 plg), es necesario que las superficies adjuntas sean de diferente material, o por lo menos del mismo material pero con diferente dureza superficial.

Las bombas con rodete cerrado diseñadas para manejar fluidos abrasivos están equipadas con pozos para limpieza. La inyección de líquido limpio dentro de estos pozós evita la entrada del material abrasivo en el claro que se tiene entre los anillos.

Rodetes de paso simple y de paso múltiple

Las bombas de paso simple se usan solamente para cargas de aproximadamente 600 pies (600 lb-pies de fuerza/lb de masa).* Para cargas superiores a este valor deben usarse rodetes de pasos múltiples. Las bombas de pasos múltiples tienen dos o más pasos conectados en serie y pueden ser bombas del tipo de voluta o difusor (Figs. 14-12 y 13). En las de voluta, cada paso descarga al siguiente a través de la voluta. En la bomba con difusor, el líquido se descarga en un difusor antes de salir de cada paso. El difusor convierte la carga de velocidad en carga de presión y después descarga el fluido a la succión del siguiente paso.

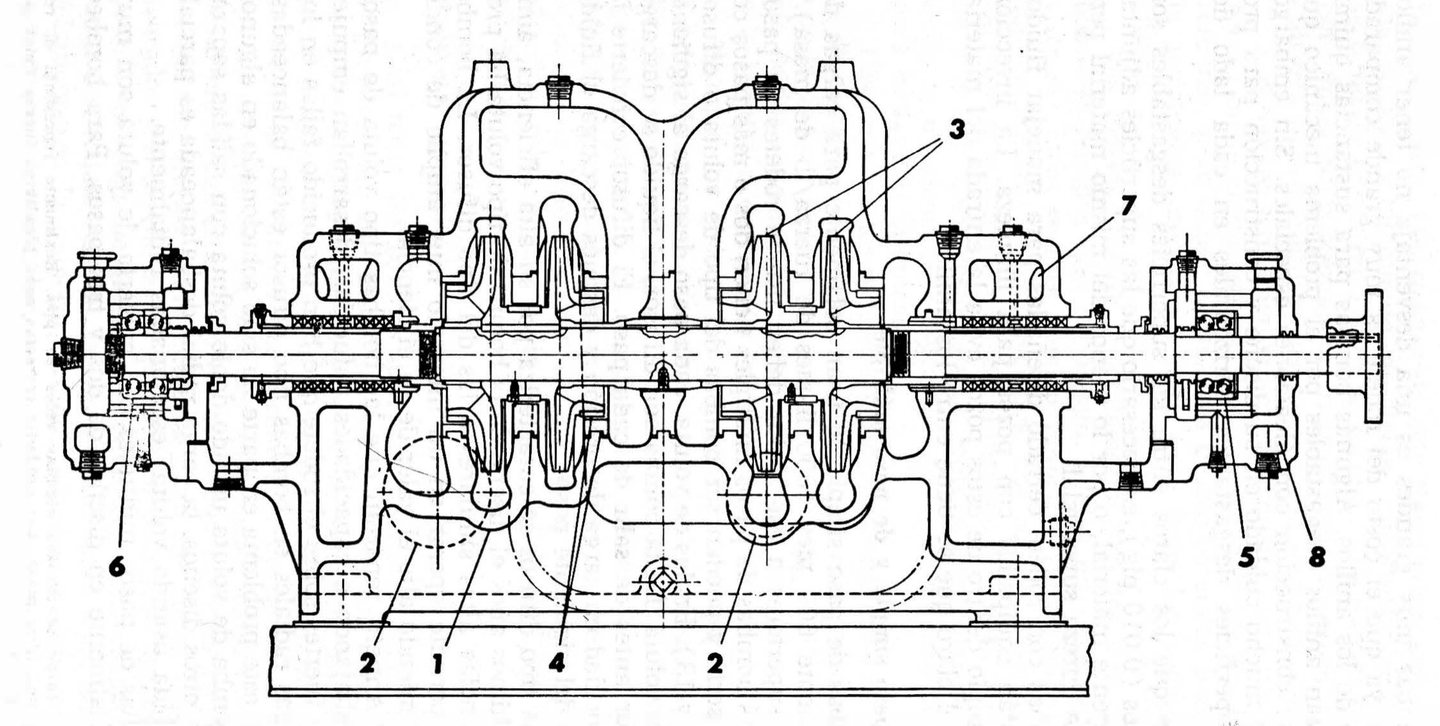
La bomba tipo difusor se caracteriza por su alta eficiencia, aunque en los últimos años el diseño de la bomba de tipo voluta ha producido eficiencias altas similares a las del tipo difusor. La bomba tipo difusor permite operar en un intervalo muy amplio de condiciones, manteniendo alto el valor de su eficiencia.

Kristal y Annett[7] reportan que las bombas tipo voluta de pasos múltiples, trabajando a capacidades reducidas, desarrollan empujes radiales muy fuertes sobre el rodete que han producido fallas en los ejes; las cargas radiales en bombas tipo difusor están balanceadas. Sin embargo, este problema en parte ha sido solucionado en algunos diseños de bomba de voluta usando doble voluta con salidas separadas 180°. En otros diseños, la carga radial desbalanceada es parcialmente absorbida usando volutas escalonadas radialmente.

Las bombas de pasos múltiples con cubierta de voluta son muy usadas especialmente en diseños de dos y tres pasos. Para bombeo

---

* El término *carga* se expresa algunas veces en pies. Realmente representa el trabajo hecho sobre una libra masa. Las unidades correctas son: pies-libras fuerza (pies-#) por libra de masa (lb).



1. Cubierta dividida axialmente, forma voluta, escalonada para balance radial.
2. Lado de succión y descarga.
3. Rodetes opuestos para balancear el empuje axial.
4. Cubierta desmontable y renovable y anillos desgastables, del rodete.
5. Cojinete radial de doble hilera de bolas, de ranura profunda.
6. Cojinete axial de bolas, de contacto angular.
7. Prensaestopas enfriado por agua.
8. Cubierta de los cojinetes, enfriada por agua.

FIG. 14-12. Bomba centrífuga tipo voluta y de pasos múltiples. (Cortesía de Pacific Pump Company.)

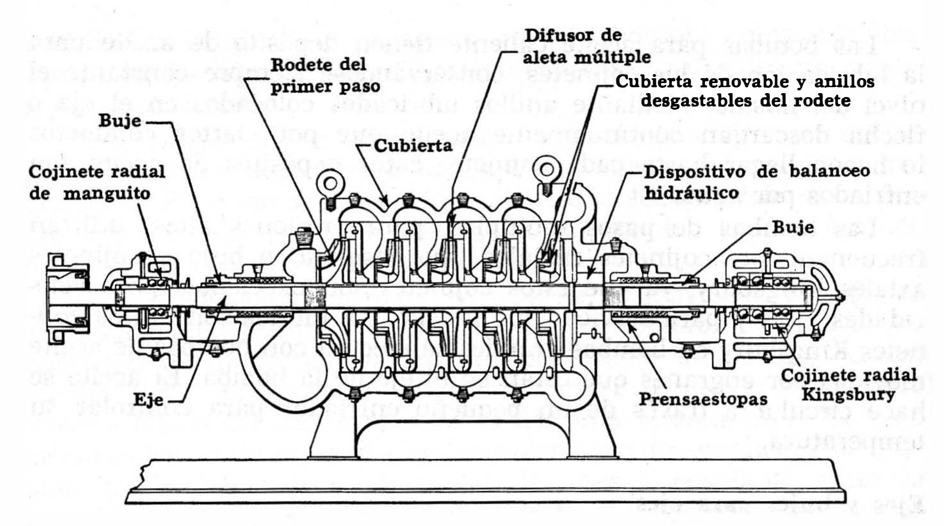


FIG. 14-13. Bomba centrífuga de pasos múltiples tipo difusor. (Cortesía de Pacific Pump Company.)

de aceite a temperatura y presión altas predomina la bomba de tipo difusor.

En las bombas de pasos múltiples, es muy importante el balanceamiento de las cargas axiales. Las bombas con cubierta de voluta tienen la ventaja de poder lograr un balance hidráulico, colocando una parte de los rodetes dirigidos en una dirección y el resto en dirección opuesta (Fig. 14-2). En las bombas de tipo difusor no se puede tener arreglo similar por problemas mecánicos que se presentan. Por lo tanto, todos los pasos en el diseño difusor deben colocarse en la misma dirección y el empuje axial es absorbido mediante un dispositivo de balanceo hidráulico que emplea una cámara de balanceamiento, la que es conectada a la línea de succión. El área de los discos de balanceamiento es tal, que el empuje axial de la bomba es balanceado por la diferencia de presiones que existen entre el lado de atrás del rodete del último paso y la cámara de balanceamiento.

Cojinetes o rodamientos

Todas las bombas tienen cojinetes radiales y axiales, ya sea que estén equipadas o no con dispositivos de balanceo hidráulico. El cojinete axial es fijo, mientras que el cojinete radial es libre para moverse axialmente junto al eje. Para las bombas de tipo general, y para muchas de las que manejan sustancias químicas, se utiliza grasa para lubricar a todos los cojinetes de bolas, tanto los de empuje radial como los de axial. Las bombas para aceite caliente usan cojinetes de bolas, pero casi todas son lubricadas con aceite.

Las bombas para aceite caliente tienen depósito de aceite para la lubricación de los cojinetes, conservándose siempre constante el nivel del mismo. Mediante anillos lubricados colocados en el eje o flecha descargan continuamente aceite que por ciertos conductos lo hacen llegar hasta cada cojinete. Estos depósitos de aceite son enfriados por agua.

Las bombas de pasos múltiples, para presiones altas, utilizan frecuentemente cojinetes radiales tipo casquillo o buje y cojinetes axiales Kingsbury, ya que estos cojinetes son excelentes para velocidades altas y para servicio tipo pesado. La lubricación de los cojinetes Kingsbury en bombas grandes se efectúa con bombas de aceite movidas por engranes que están en el eje de la bomba. El aceite se hace circular a través de un pequeño enfriador para controlar su temperatura.

Ejes y bujes para ejes

Para soportar las fuerzas que actúan en el eje de una bomba centrífuga, ésta deberá hacerse de aleación de acero de alta resistencia a la tensión (SAE 1035, SAE 4140, SAE 2340 y otras aleaciones como 11-13% de cromo). En todas las bombas pequeñas se instala un buje o camisa en el eje, en el tramo correspondiente al prensaestopas, con el fin de protegerlo contra la corrosión y el desgaste. Dependiendo de la naturaleza del flujo bombeado se escoge el material del buje.

Prensaestopas

Como puede observarse en la Fig. 14-9 el eje de la bomba pasa a través del prensaestopas cuando éste entra a la cubierta de la bomba. El diseño correcto del prensaestopas es un factor muy importante para la operación satisfactoria de la bomba, ya que previene las fugas hacia adentro y hacia afuera de la bomba.

El prensaestopas puede empacarse ya sea como se muestra en la Fig. 14-9 o utilizar sellos mecánicos (Fig. 14-14). Los prensaestopas pueden empacarse sólidamente o bien con caja de sellos o con anillos de cierre hidráulico, localizados en el centro del lugar de empaque (Fig. 14-9).

Para bombas que trabajan con presiones de succión baja, el uso de los anillos de cierre hidráulico o de caja sellada evita el paso de aire hacia el interior de la bomba. Se inyecta líquido sellante a los anillos de cierre hidráulico, el cual se distribuye a través de los empaques produciéndose, además, el efecto de enfriamiento y lubricación. Una pequeña parte del líquido se fuga hacia el exterior a través del collarín del prensaestopas.

El mismo líquido bombeado puede usarse como líquido para sellar, descargándolo a los anillos de cierre hidráulico. Sin embargo,

si el líquido bombeado es corrosivo o erosivo, deberá emplearse otro líquido para sellar. En las refinerías de petróleo se utiliza un aceite especial para sellado.

Para condiciones en que se tengan temperaturas altas, se utiliza para los prensaestopas fluido sellante que puede ser enfriado y recirculado. En diseños de este tipo, el líquido sellante frío entra por un lado del prensaestopas, circula por su interior y pasa después por un enfriador para después recircularlo.

Con frecuencia se instalan sistemas de líquidos sellantes (aceite para sellar) en plantas que tienen un gran número de bombas que necesitan de fluido para sellar. Se puede tener un cabezal común adonde llegue el aceite de todas las bombas para después hacerlo pasar a través del enfriador para su posterior recirculación. El flujo sellante dentro de la bomba es controlado por un regulador de presión que mantiene un diferencial de presión constante entre la succión y la caja de sellos. Además de lo anterior para las bombas de aceite caliente, con frecuencia se usa una chaqueta de agua que rodea al prensaestopas.

En caso de que el líquido lubricante que se fuga a través del prensaestopas esté a temperatura lo suficientemente alta que cause vapores inflamables nocivos o desagradables, deberá usarse en el prensaestopas un collarín asfixiante en lugar del collarín comúnmente usado. El collarín asfixiante está arreglado de tal modo que le llegue agua fría hasta el lugar donde hace contacto el líquido con el collarín. El agua enfría al líquido sellante evitando en esa forma la vaporización.

Casi todas las bombas para servicio general y para bombeo de sustancias químicas están diseñadas para poder alojar de cuatro a cinco anillos de empaque convencional; las bombas para aceite caliente pueden alojar de siete a diez anillos. El empaque adecuado es una necesidad. Cuando el prensaestopas está mal empacado no puede girarse con la mano el eje de la bomba.

Las bombas de servicio general utilizan empaques con asbestos impregnados de grafito. El empaque usado en las bombas para sustancias químicas se escoge de acuerdo con el líquido que va a ser bombeado. Se usan empaques metálicos en las bombas para aceite caliente ya que se tienen temperaturas muy elevadas; se usa empaque metálico en ejes que tienen bujes de acero endurecido. Para ejes que tienen bujes de bronce, deberán usarse empaques de grado suave.

El problema de los empaques es extremadamente difícil en aquellos procesos industriales en los que se bombean materiales volátiles a temperaturas y presión altas. Varios fabricantes han elaborado sellos mecánicos para servicios severos (Fig. 14-14). Estos se em-

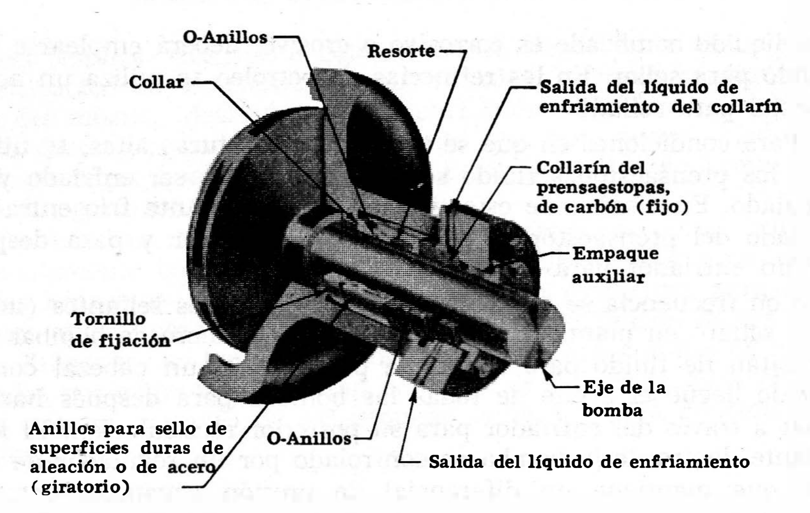


FIG. 14-14. Sello mecánico. (Cortesía de Durametallic Corporation.)

plean en lugar del empaque del prensaestopas y casi todas las bombas para aceite caliente y sustancias químicas están diseñadas para recibir este tipo de empaque. El sello mecánico es más caro, pero con frecuencia las condiciones de servicio justifican su uso.

El sello mecánico consiste de dos superficies en contacto que están altamente pulidas. El contacto se mantiene por medio de resortes que son ajustables y se mantiene con ellos la fuerza necesaria para prevenir fugas del líquido que está siendo bombeado. Las superficies son de materiales diferentes. Una de las superficies está fija y unida a la estructura mientras que la otra gira y está sujeta al eje de la bomba. Las superficies se lubrican con el líquido que se está bombeando o por un fluido auxiliar si el líquido bombeado no posee cualidades para lubricación. El sello mecánico evita efectivamente todas las fugas que se tengan en el prensaestopas, aun cuando se tenga una presión alta en el mismo. Por lo tanto, este sello es el particularmente indicado a usarse en aquellos servicios en los que no se permiten fugas, como en el bombeo de hidrocarburos ligeros los que tienen punto de ebullición muy bajo o en el bombeo de sustancias corrosivas o tóxicas.

Se utiliza sello mecánico doble para manejar líquidos de temperatura alta o altamente corrosivos. Esto se diseña de tal modo que el líquido lubricante pueda hacerse pasar a través de los sellos, evitando el contacto con el líquido bombeado.

Acoplamientos

Se usan acoplamientos flexibles (Fig. 14-9) del tipo de rejilla de resorte de acero, engranes, separador y perno, y bujes de caucho.

Estos acoplamientos pueden compensarse para ligeros desalineamientos que se tengan, pero nunca deben usarse como junta universal; es necesario tener mucho cuidado con el alineamiento de los ejes. Por lo general, el acoplamiento flexible lo proporciona el fabricante de la bomba, debiendo indicársele las dimensiones del eje motriz a fin de que el acoplamiento tenga el agujero adecuado.

Placas para la base

Por lo general, los fabricantes de bombas suministran la placa base sobre la que se instala la bomba y a la que se le hacen los agujeros necesarios para recibir al motor o a la turbina que impulsará a la bomba. El cliente deberá proporcionarle al fabricante de bombas los dibujos certificados obtenidos del fabricante de la unidad que impulsará a la bomba; en el mismo se indican las dimensiones de la unidad (por razones prácticas resulta más económico comprar por separado la bomba y la unidad motriz). El equipo se embarca separadamente y se instala en la obra. Por lo general, para las bombas pequeñas las bases se hacen de canales de acero. Para bombas grandes, las bases son de hierro fundido y tienen canaletas de forma circular con pendiente hacia un extremo para el drenado del líquido que se fugue. También se proporcionan con agujeros para la extracción de lechadas o sedimentos. En instalaciones extremadamente grandes puede resultar más económico instalar la bomba y la unidad motriz en placas separadas colocadas sobre el mismo cimiento; esto en lugar de tener una placa común.

Unidades motrices

Las bombas centrífugas son impulsadas por motores o por turbinas conectadas directamente. Cuando se instalan dos bombas para tener a una de ellas de reserva, una se conecta a motor y la otra a turbina; de esta manera se tiene una mayor flexibilidad.

Materiales de construcción

Una ventaja que distingue a las bombas centrífugas es la gran variedad de materiales que pueden emplearse en la construcción de sus partes. Las cubiertas pueden hacerse de materiales que pueden ser desde vidrio y objetos de barro hasta aceros aleados de gran dureza. Por lo tanto, las proposiciones generales son de escaso valor. Se ha determinado que, para las plantas de procesos, las partes de bronce pueden emplearse en operaciones hasta arriba de 250°F, y las partes de hierro fundido no deben usarse para temperaturas arriba de 350 a 400°F. Para temperaturas superiores a 400°F, frecuentemente se usan aceros al cromo de 11–13%.

Cálculos para bombas centrífugas

Potencia y eficiencia

Los caballos potencia agua para bombas centrífugas se definen de la misma manera que para bombas de pistón. La potencia al freno se define como potencia a la entrada en la flecha de la bomba y es obtenida multiplicando los caballos agua por la eficiencia. La eficiencia para bombas centrífugas es de valor total e incluye las eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica.

$$E = \left(\frac{\text{WHP}}{\text{BHP}}\right)(100)$$

Curvas de rendimiento

La gráfica de la Fig. 14-15 representa una curva típica de rendimiento carga-capacidad para una bomba centrífuga trabajando a velocidad constante. Se pueden obtener de la misma, para un gasto conocido, los valores correspondientes de la eficiencia, la potencia al freno y el valor mínimo de la carga de succión neta positiva. Estas curvas las proporciona el fabricante de bombas para cada tamaño y tipo de bomba que fabrica. La curva capacidad-carga representa el trabajo por unidad de masa de fluido bombeado, llamado carga (pies-lb de fuerza/lb de masa) para cada gasto posible. La carga, a la que con frecuencia se le llama pies de carga, puede convertirse multiplicándola por el peso específico a la presión diferencial bajo la cual opera la bomba.

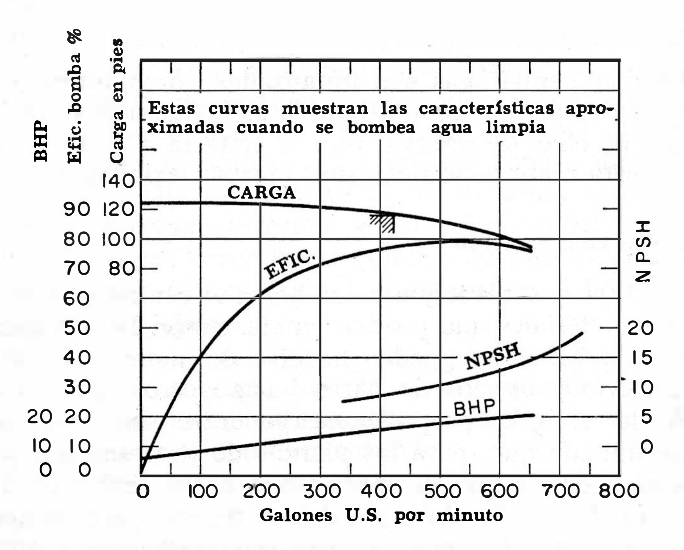


FIG. 14-15. Curvas de rendimiento para una bomba centrífuga. (Adaptada con permiso de Allis Chalmers Company.)

Por lo general, las curvas están trazadas para bombeo de agua clara y fría. Las características de bombeo para otros líquidos no son necesariamente las mismas que las del agua.

La curva característica no debe confundirse con las llamadas curvas de prueba. Las curvas de prueba se obtienen a partir de pruebas reales efectuadas en la bomba en la que se deseen determinar; éstas pueden comprarse junto con la bomba. Las curvas características representan el comportamiento medio del tipo de bomba comprado y es muy posible tener variaciones pequeñas entre varias bombas del mismo modelo y tamaño. Por lo general, no es necesario ni económico solicitar las curvas de prueba con excepción para el caso de bombas muy grandes y caras en cuyo caso el costo de la prueba representa una fracción muy pequeña del costo total.

La marca

⌉

que aparece en las curvas característica indica la carga y la capacidad para las que la bomba fue vendida. La marca

$\wedge$

indica la eficiencia garantizada. En general, las bombas se seleccionan para que operen a la mayor eficiencia posible (por lo general se designa por BEP a la máxima eficiencia obtenible).

A medida que se aumenta la capacidad de una bomba centrífuga, se llega a un punto en el que la velocidad del fluido en la cubierta se incrementa de tal manera que las presiones en la cubierta se igualan o son menores que la presión del vapor. A este punto se le llama punto de corte o punto de rompimiento porque se empiezan a formar burbujas de vapor y, como resultado de ello, se tiene una baja en los valores de la carga, eficiencia y capacidad. Por esta razón nunca deben extrapolarse las curvas de rendimiento.

Leyes de similitud

De acuerdo con los principios del análisis dimensional, se ha obtenido la siguiente relación de acuerdo con las propiedades físicas que afectan la operación de las bombas.*

$$f\left[\frac{Q}{(g_cH)^{1/2}D^2}, \frac{nQ^{1/2}}{(g_cH)^{3/4}}, \frac{\rho QD}{\mu D^2}\right] = 0 \qquad (1)$$

donde Q = capacidad, pies cúbicos/unidad de tiempo

H = carga de la bomba, pies-#/lb

n = velocidad, revoluciones/unidad de tiempo

D = diámetro del rodete, longitud

g_c = lb-pie/(tiempo)^2/#, 32.17 para tiempo en segundos

* Este desarrollo está basado en un trabajo muy completo de Stepanoff.[10]

ρ = masa específica, masa/longitud al cubo
μ = viscosidad absoluta
= libras fuerza
lb = libras masa

Se designará, en el orden en que aparecen por π_1, π_2 y π_3 a las expresiones adimensionales. Por analogía dinámica, π_1, π_2 y π_3 deben ser constantes para bombas similares o para la misma bomba a diferentes velocidades. π_3 representa al número de Reynolds ya que Q/D^2 es proporcional a la velocidad y no puede permanecer constante al haber cambios en la velocidad o tamaño de la bomba para bombeo del mismo líquido. Sin embargo, para aplicaciones prácticas se ha demostrado que se puede despreciar el número de Reynolds al considerar las condiciones de similitud dinámica.

Por lo tanto, para condiciones de similitud dinámica, los valores de π_1 y π_2 son constantes. La forma de la ecuación 1 puede modificarse por la operación matemática adecuada dada en la siguiente expresión:

$$f\left[\frac{Q}{(g_cH)^{1/2}D^2}, \frac{nD}{(g_cH)^{1/2}}\right] = 0$$

Llamando $nD/(g_cH)^{1/2} = \pi'_2$ puede establecerse por condiciones de similitud que son constantes los términos π_1, π_2 y π'_2.

Se ha demostrado[10] que para bombas similares o para la misma bomba a diferentes velocidades, los diagramas de velocidad del rodete son geométricamente similares cuando las bombas operan a la misma eficiencia.

Aplicaciones de las leyes de similitud

Se hacen las siguientes conclusiones:

Para las mismas bombas o bombas geométricamente similares, los términos $Q/(g_cH)^{1/2}D^2$, $nD/(g_cH)^{1/2}$ y $nQ^{1/2}/(g_cH)^{3/4}$ tienen valores únicos correspondientes a cada eficiencia, y estos valores permanecen constantes independientemente del diámetro del rodete, o de la velocidad de la bomba.

Lo constante de los diferentes grupos adimensionales expresados anteriormente corresponde a un caso ideal y no completamente verdadero. Sin embargo, es una aproximación muy útil y se pueden obtener varias relaciones que serán de mucho valor para el ingeniero químico en la determinación de las características de operación de una bomba cuando se cambia el diámetro, o la velocidad de la bomba.

Para la misma bomba trabajando a velocidades diferentes:

$$D = \text{constante}$$

Por lo tanto, para cualquier eficiencia dada:

Capacidad

$$\frac{Q}{(g_cH)^{1/2}D^2} \quad \text{y} \quad \frac{nD}{(g_cH)^{1/2}} \text{ son constantes}$$

o

$$\frac{Q}{(g_cH)^{1/2}D^2} \div \frac{nD}{(g_cH)^{1/2}} = \text{constante}$$

En consecuencia,

$$\frac{Q}{nD^3} = \text{constante} = K \tag{2}$$

Pero D es constante

$\therefore \quad Q = K'n \qquad$ donde K y K' son constantes

o

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \tag{3}$$

Carga

$$\frac{nD}{(g_cH)^{1/2}} = \text{constante} = J$$

o

$$\frac{n^2D^2}{H} = J' \quad \text{donde } J \text{ y } J' \text{ son constantes} \tag{4}$$

Por lo tanto, para diámetro constante

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$$

BHP

$$\text{BHP} \propto QH \propto n^3 \quad \text{para la constante } D$$

$$\frac{\text{BHP}_2}{\text{BHP}_1} = \frac{n_2^3}{n_1^3} \tag{5}$$

La aplicación de estas leyes se ilustra en el siguiente ejemplo. Recuérdese que estas leyes solamente se aplican para eficiencias del mismo valor.

EJEMPLO: Dada la curva de rendimiento a 3 500 rpm ilustrada en la Fig. 14-16, se desea calcular la nueva curva de rendimiento a 1 750 rpm.

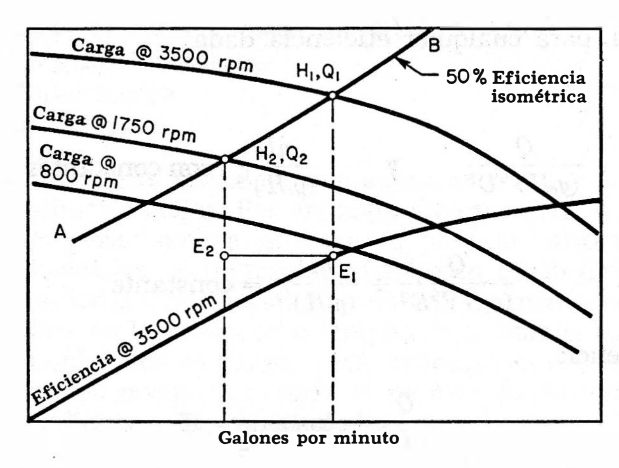


FIG. 14-16. Estimación de la curva de rendimiento para nuevas condiciones.

SOLUCIÓN:

1. Seleccionar cualquier eficiencia y leer los correspondientes valores de Q y H.

2. Resolver para H_2 y Q_2.

$$H_2 = H_1 \left(\frac{1750}{3500}\right)^2$$

$$Q_2 = Q_1 \frac{1750}{3500}$$

3. Indicar estos valores en un punto de la curva capacidad-carga.

4. Trazar el valor de la eficiencia seleccionada contra el valor de Q_2; éste será un punto sobre la curva de eficiencia para 1 750 rpm.

5. De manera similar se seleccionan diferentes puntos para después trazar la curva deseada.

6. La curva BHP se calcula de manera similar.

Puede calcularse una familia de curvas para diferentes velocidades. La línea AB en la Fig. 14-16 indica una línea de eficiencia constante (50%). Habrá muchas líneas que correspondan a las diferentes eficiencias. Las leyes de similitud se aplicarán solamente a estas líneas.

*Para bombas geométricamente similares, con diferentes diámetros de los rodetes, pero a la misma velocidad:**

Para puntos de la misma eficiencia:

Capacidad

De la Ec. 2 anterior

$$Q = KnD^3$$

* Cada estilo o tipo de bomba se fabrica en muchos tamaños diferentes. Se dice que las bombas son geométricamente similares, cuando para los diferentes tamaños de bomba se conserva igual la relación entre las dimensiones de la cubierta y el rodete.

A velocidad constante

$Q = K''D^3$ donde K y K'' son constantes

o

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{6}$$

Carga

A velocidad constante, de la ecuación anterior 4:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \tag{7}$$

BHP

De igual manera

$$\frac{\text{BHP}_2}{\text{BHP}_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \tag{8}$$

Aplicación: Conocida una curva, se puede preparar una serie de curvas para diferentes diámetros, haciéndolo por el procedimiento anteriormente descrito.

CAMBIOS EN LOS DIÁMETROS DE LOS RODETES DE LA MISMA CUBIERTA. Para un ingeniero químico resultan más importantes los cambios producidos en una bomba, debidos a la reducción del diámetro de los rodetes que la variación de la carga y capacidad en una serie de bombas geométricamente similares. Puede instalarse un rodete de diámetro menor, o reducir en un torno el diámetro de un rodete. La combinación formada por el nuevo rodete y su cubierta no resulta ser geométricamente similar al arreglo original, pero puede determinarse aproximadamente el efecto de la reducción del diámetro suponiendo que se reduce la velocidad periférica de la descarga sin ser afectada por la eficiencia. La velocidad periférica es directamente proporcional al diámetro del rodete y, por lo tanto, $Q \alpha u \alpha D$. La carga es proporcional a $u^2/2g_c$ (donde u es la velocidad periférica).

Estas aproximaciones conducen a las siguientes relaciones, las que se aplican para eficiencias iguales, igual que para las ecuaciones anteriores basadas en las leyes de similitud.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \tag{9}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \tag{10}$$

$$\frac{\text{BHP}_2}{\text{BHP}_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{11}$$

Estas relaciones no son tan exactas como las leyes de similitud y deberán usarse con precaución, ya que la eficiencia se reduce al efectuar reducciones grandes en el diámetro del rodete. Prácticamente es preferible hacer un primer rebaje y probar el rodete antes de efectuar el corte final (por ejemplo, si se ha calculado que el nuevo diámetro sea de un valor igual al 75% del diámetro original, rebajar primero un 80% del corte total y hacer pruebas). Para comprensar algunas de las inexactitudes inherentes a estos cálculos, Stepanoff[10] presenta un análisis de correcciones a la relación de diámetros calculados tanto para rodete radial como para tipo Francis (velocidad específica alta). Sugiere en su estudio una corrección de aproximadamente 90% del valor calculado para rodetes radiales y de 80% para rodetes tipo Francis.

EJEMPLO: Una bomba con rodete radial de 16 plg trabaja a 1 750 rpm y produce un gasto de 2 600 gpm a 200 pies y a eficiencia máxima. ¿De cuánto será la reducción necesaria en el diámetro del rodete para reducir el gasto a 2 000 gpm a la BEP? ¿Cuál será el valor de la nueva carga?

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{2000}{2600} = 0.77$$

Reducción $(100)(0.23)(0.9) = 20.7\%$

o $$D_2 = (16)(1 - 0.207) = 12.7 \text{ plg}$$

Nueva carga:

$$H_2 = H_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = (200)\left(\frac{12.7}{16}\right)^2$$

$$= 178 \frac{\text{pies-\#}}{\text{lb}}$$

VELOCIDAD ESPECÍFICA

Una de las expresiones adimensionales en las leyes de similitud es

$$\frac{nQ^{1/2}}{(g_c H)^{3/4}} = \text{constante para una eficiencia dada.}$$

Los técnicos en bombas, con frecuencia usan la expresión $nQ^{1/2}/(H)^{3/4} = n_s$, a la que se le llama velocidad específica. Puesta en esta forma, la expresión pierde sus propiedades adimensionales ya que el término g_c ha sido omitido. Arbitrariamente Q y H se expresan en gpm y en pies, respectivamente.

A menos que otra cosa se estipule, la velocidad específica de una bomba se da para el punto de eficiencia máxima [best efficiency point, (BEP)], el cual tiene el mismo valor numérico para todas las bombas similares.

Nunca intente darle un significado físico a la velocidad específica. Este es simplemente un número utilizado como caracterís-

tica tipo para rodetes geométricamente similares. La velocidad específica varía desde cero hasta infinito para cualquier rodete dado, y tiene un valor constante para rodetes de diferentes tamaños y velocidades, pero que operan a la misma eficiencia. Cuando se emplea como número tipo, éste corresponde solamente al punto de mayor eficiencia.

El primero y más importante paso en el diseño mecánico de una bomba es la selección de la velocidad específica y del tipo de rodete que maneje más eficientemente el problema de bombeo. Las constantes usadas en el diseño del rodete están relacionadas con la velocidad específica para calcular el diámetro del rodete, las áreas en la entrada y en la salida del rodete y otros factores que intervienen en el diseño de la bomba. Además, la velocidad específica está relacionada con las condiciones de succión y la carga neta positiva de succión (véase más abajo).

Ya que la velocidad específica es una característica tipo, se le puede utilizar para la selección de la bomba si no se tienen más datos disponibles para ello.

Ejemplo: Una bomba de velocidad específica 554 tiene un rodete de 8 plg y trabaja a 3 500 rpm; bombea 63 gpm a 187 pies de carga a máxima eficiencia. Se va a instalar una bomba nueva de características geométricas similares para un gasto de 520 gpm y 300 pies de carga correspondiendo a su punto de mejor eficiencia. ¿Cual será la velocidad y el diámetro del rodete?

$$n_s = \frac{nQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$554 = \frac{n(520)^{1/2}}{(300)^{3/4}}$$

o

$$n = 1750 \text{ rpm}$$

Las leyes de similitud se aplican a la misma eficiencia, por lo tanto

$$\frac{Q_1}{n_1(D_1)^3} = \frac{Q_2}{n_2(D_2)^3}$$

$$\frac{63}{(3500)(8)^3} = \frac{520}{(1750)(D_2)^3}$$

o

$$D_2 = 20.3 \text{ plg}$$

Correcciones a la curva de rendimiento para líquidos viscosos

El número de Reynolds suele despreciarse en cálculos de bombas centrífugas para líquidos no viscosos como el agua. Sin embargo, el número Reynolds juega un papel muy importante en el caso de líquidos viscosos. La viscosidad modifica la localización del punto en la curva carga-capacidad, así como en la eficiencia, esto debido al aumento de pérdidas por fricción.

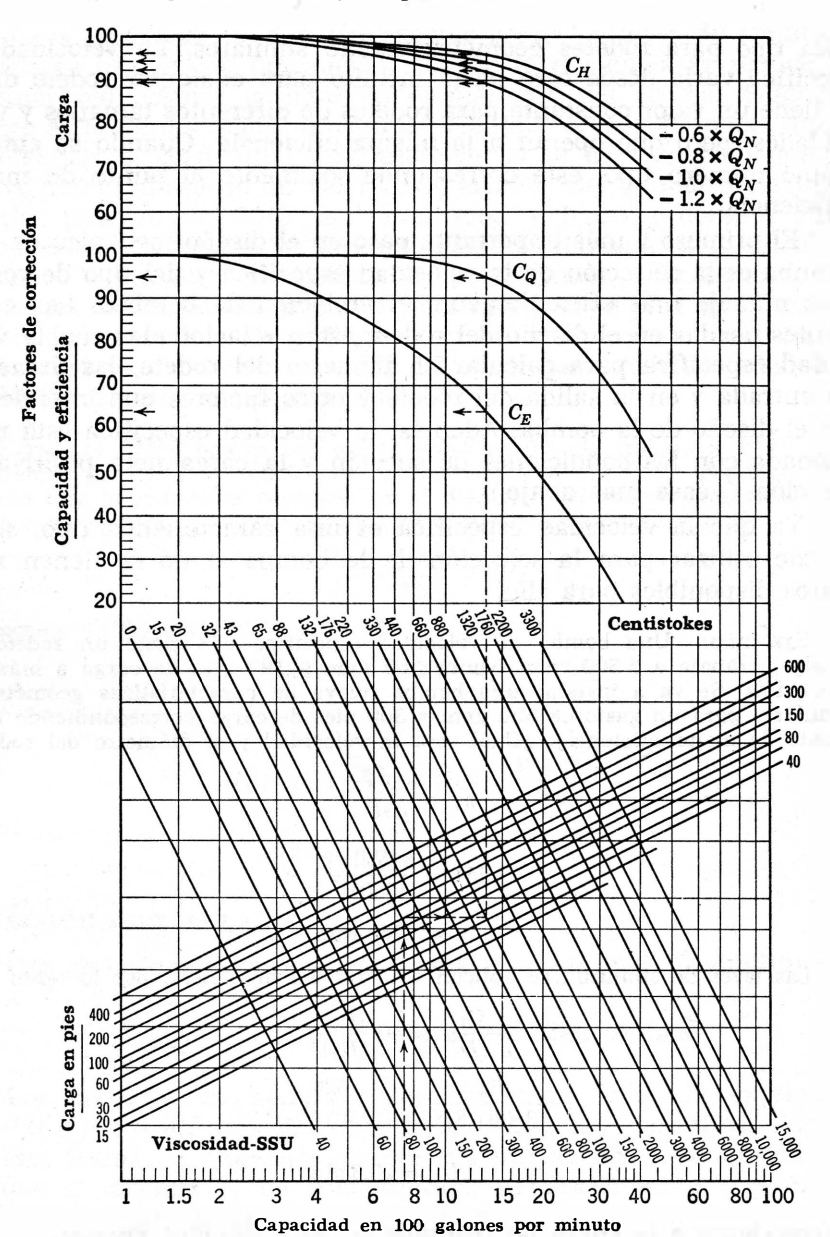


FIG. 14-17. Curvas de corrección de la viscosidad usadas para bombas centrífugas. (Reproducido de *Standards of Hydraulic Institute*, derechos de autor, 1955, Hydraulic Institute, 122 E. 42nd St., New York 17, N. Y.)

USO DE LA FIG. 14.17:

Conocidas las características completas de una bomba para agua, determinar el gasto a eficiencia máxima ($1.0 \times Q_{nw}$). Calcular $0.6 \times Q_{nw}$, $0.8 \times$

Las curvas usuales de rendimiento están trazadas considerando que el líquido bombeado es agua. Se han efectuado muchos experimentos con muchos tipos de bombas a fin de determinar los factores de corrección aplicables a la carga (H_w) y a la eficiencia (E_w) para agua correspondiente al BEP, para obtener los valores correspondientes a líquidos viscosos. Estos valores están relacionados con el número Reynolds y están dados en las normas del Instituto de Hidráulica[9] o en *Bombas Centrífugas y Axiales* de Stepanoff.[10]

Se aplican las siguientes relaciones

$$H_v = C_H H_w$$

$$E_v = C_E E_w$$

donde H_w y H_v = carga para agua y líquido viscoso respectivamente
E_w y E_v = eficiencia para agua y líquido viscoso respectivamente
C_H y C_E = factores de corrección para carga y eficiencia

Ya que la velocidad específica es constante en el punto de mejor eficiencia:

$$\frac{nQ_w^{1/2}}{H_w^{3/4}} = \frac{nQ_v^{1/2}}{H_v^{3/4}}$$

o

$$\frac{Q_v}{Q_w} = \left(\frac{H_v}{H_w}\right)^{3/2}$$

De este modo puede calcularse el valor de Q_v (gasto de líquido viscoso) correspondiente a H_v. Se puede establecer un segundo punto en el punto de corte (0 gpm) ya que la velocidad no tiene efecto a flujo 0 y, por lo tanto, la eficiencia (cero a flujo cero) y la carga permanecen en el mismo punto de corte. Estos dos pares de puntos permiten el trazo de las curvas corregidas para el líquido viscoso. El Instituto de Hidráulica[9] ha desarrollado un nomograma (Fig.

Q_{nw} y $1.2 \times Q_{nw}$. Se entra al nomograma con el gasto o capacidad de agua, se sigue hacia arriba hasta interceptarse con el valor correspondiente de la carga H_W; después se sigue horizontalmente (ya sea hacia la derecha o hacia la izquierda) hasta interceptarse con la línea inclinada de la viscosidad correspondiente al líquido bombeado; después se sigue verticalmente hasta interceptarse con las curvas correspondientes; en seguida, y siguiendo hacia la izquierda, se leen los valores de C_E (corrección de la eficiencia), C_Q (corrección de la capacidad) y cuatro valores de C_H (corrección de la carga) correspondientes a las cuatro curvas de capacidades. Se multiplican los valores de la carga, capacidad y eficiencia correspondientes al agua, por los factores obtenidos a fin de obtener los valores corregidos.

Trazar los valores de carga y eficiencia corregidas contra capacidad corregida. Dibujar curvas suaves a través de estos puntos. La carga correspondiente a la intersección es aproximadamente la misma que para el **agua.**

14-17) mediante el cual pueden estimarse más de dos puntos para trazar la curva con más exactitud.

NPSH (carga positiva neta de succión)

Quizá no se tenga ningún otro tema en el diseño y selección de bombas que no se haya discutido tan profusamente como el cálculo de la NPSH, aun cuando no existan muchas razones para ello. El cálculo de la NPSH es sencillo y no requiere explicación de los detalles.

La NPSH es simplemente la presión total de succión en la tobera de succión de la bomba, menos la presión del vapor del líquido que corresponde a la temperatura de bombeo, expresada en pies-libra de fuerza por libras de masa (por lo general se refiere el valor de la NPSH como pies de líquido bombeado).

$$NPSH = h_s - h_{vp}$$

o

$$NPSH = h'_s - h'_{vp}$$

donde h_s = carga total de succión en pies-#/lb absoluta (incluye la presión atmosférica)

h_{vp} = presión absoluta del vapor en pies-#/lb

h'_s y h'_{vp} = mismo significado que los anteriores, pero para presiones manométricas, en pies-#/lb

La presión del vapor, por lo general, se refiere a presión absoluta. Las llamadas presiones de vapor "Reid" se refieren a valores manométricos.

La NPSH es importante en la selección e instalación de bombas que manejan líquidos cuya temperatura sea próxima al punto de ebullición. El funcionamiento de la bomba será imposible o defectuoso si no se tiene carga de valor suficiente arriba de la correspondiente presión de vaporización. Como la presión en la succión de la bomba tiene un valor próximo a la presión de vaporización del líquido, se forman burbujas de vapor en la cubierta de la bomba, con la consiguiente deformación en la descarga de la cubierta. A este fenómeno se le llama cavitación* y puede causar grandes picaduras en el rodete y en la cubierta. Además, al aumentarse la vaporización se interrumpe el bombeo y opera en forma discontinua. Una bomba centrífuga solamente puede producir la carga en pies-#/lb indicada por la curva característica. Con valores de presiones muy bajas como las que tienen las sustancias de masa específica de bajo valor, tales como vapores, la bomba no puede producir la presión de descarga necesaria en el sistema.

El Instituto de Hidráulica[9] reporta valores apropiados de la NPSH para bombeo satisfactorio de agua caliente; esto relacionado

* Al tenerse cavitación en una bomba, su funcionamiento es muy ruidoso produciéndose, además, vibraciones en la bomba.

con la velocidad específica; además, proporciona los factores de corrección para bombeo de hidrocarburos. Los fabricantes recomiendan valores de la NPSH para sus bombas. Por lo general, estos valores se indican en la curva característica proporcionada junto con la bomba (véase la Fig. 14-15).

Gravedad específica y carga

La llamada carga de una bomba centrífuga es realmente una unidad de trabajo expresada correctamente como pies-lb de fuerza por libra de masa (pies-#/lb), aunque realmente es referida como pies de carga. Si se entiende claramente este hecho, se entenderá fácilmente el efecto de la gravedad específica o densidad del líquido bombeado, en el funcionamiento de la bomba. Los valores de las cargas en la curva característica no se ven afectados por la densidad, ya que la carga se expresa como trabajo por unidad de masa de fluido que la bomba realiza para proporcionar un volumen de flujo. Sin embargo, para calcular el trabajo hecho en la unidad de tiempo, el volumen del flujo debe convertirse a masa multiplicándolo por la densidad; además, la presión diferencial en lb/plg² depende de la densidad.

$$\text{lb/plg}^2 = \left(\frac{\text{pies-\#}}{\text{lb}}\right)\left(\frac{\text{lb}}{\text{pies}^3}\right)\left(\frac{1}{144}\right)$$

Puntos de operación de bombas centrífugas

Para cualquier disposición de tubería, la curva de un sistema de carga puede ser superpuesta sobre la gráfica carga-velocidad de la bomba. La curva del sistema de carga está constituida por la carga potencial (estática), carga de presión y carga de fricción. Solamente esta última varía con el flujo. En la Fig. 14-18 se muestra dicha superposición. Al punto en el que se cruzan las dos curvas

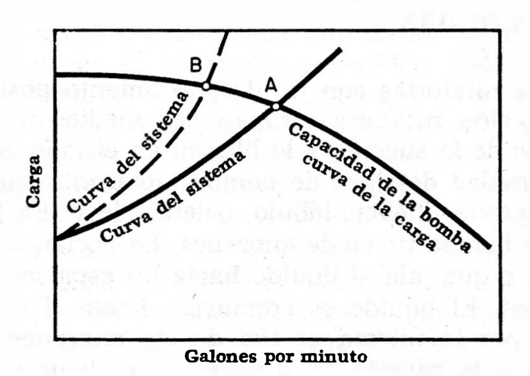


FIG. 14-18. Puntos de operación de una bomba centrífuga.

(punto *A*) se le llama punto de operación del sistema. Representa el flujo que la bomba entregará; éste será el único valor del flujo, a menos que se cambien las características del sistema. La forma usual de hacerlo es mediante un estrangulamiento de la válvula de descarga. El estrangulamiento proporciona una carga mayor al sistema, moviéndose el punto hacia la izquierda reduciéndose con ello la capacidad de la bomba. La posición del punto *B* depende del estrangulamiento que se tenga en la válvula.

Arreglos de bombas en serie y en paralelo

Cuando no es posible satisfacer las condiciones de carga con una sola bomba, pueden emplearse dos o más bombas en serie. Para bombas conectadas en serie, la velocidad del flujo es constante a través de cada bomba. Se suman las cargas de las curvas carga-velocidad para dos bombas conectadas en serie. Se puede determinar la entrega para un sistema dado por la intersección de la curva del sistema con la nueva curva característica, resultante de la combinación.

Con un arreglo de bombas en paralelo, se aumenta la capacidad con respecto a la entregada por una bomba sola. Para un arreglo en paralelo, las bombas producen igual carga y se determina la nueva curva carga-capacidad sumando las capacidades de las bombas. Con frecuencia se usan los arreglos en paralelo en las estaciones de bombeo donde la demanda es muy variable. Por lo menos una de las bombas deberá desconectarse en los periodos de baja demanda. Para que el funcionamiento de bombas en paralelo sea satisfactorio, las bombas deberán tener curvas características estables, debiendo evitarse oleadas u oscilaciones durante el bombeo. Una curva estable es aquella que aumenta constantemente su carga al bajar hasta cero su capacidad.

BOMBAS ROTATORIAS

Las bombas rotatorias son de desplazamiento positivo, y que a través de su acción rotatoria atrapan por medios mecánicos al líquido en el lado de la succión y lo liberan en el lado de la descarga. De entre la variedad de tipos de bombas rotatorias que se fabrican están los de engranes, hélice, lóbulo, paleta y leva. En la Fig. 14-19*a* se muestra una bomba típica de engranes. La acción de los engranes produce un vacío que jala al líquido hacia los espacios que se tienen entre los dientes. El líquido es conducido hacia el otro lado de la bomba, donde por la misma acción de los engranes el líquido es descargado hacia la tubería de descarga. Las bombas de este tipo producen presiones hasta de 1 000 lb/plg² y gasto de 300 gpm.

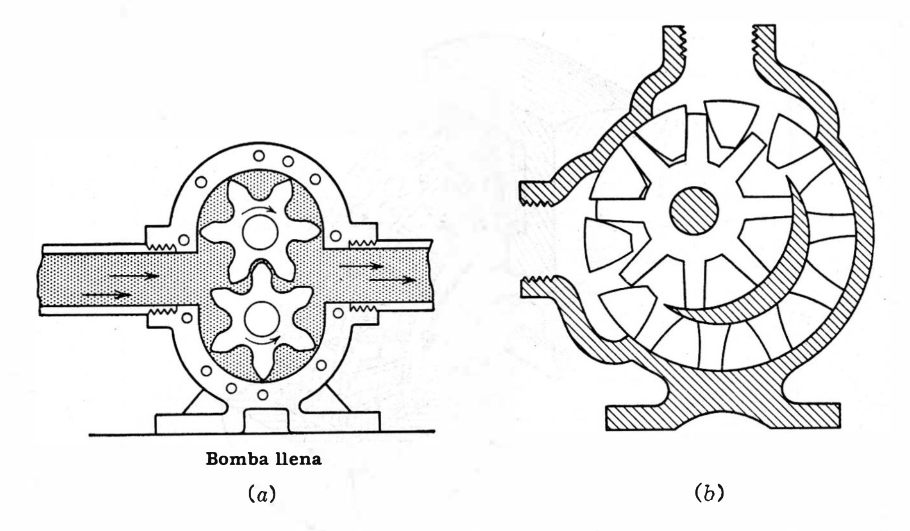


Fig. 14-19. Bombas de engrane. (*a*) Bomba de engrane externo. (Cortesía de Geo. D. Roper Company); (*b*) bomba de engrane interno. (Cortesía de Viking Pump Company.)

En la Fig. 14-19*b* se muestra otro tipo de bomba de engrane, llamada de engrane interno. La forma de luna creciente en el interior de esta bomba actúa como un sello entre los conductos de succión y descarga. Estas bombas se fabrican para capacidades altas como 1 000 gpm y presiones de 200 lb/plg^2.

Teóricamente, todas las bombas rotatorias deben entregar el mismo volumen, independientemente de la presión de descarga. Sin embargo, se necesita de un cierto claro para efectuar la rotación y esto causa una pequeña fuga (deslizamiento). El deslizamiento es inversamente proporcional al diferencial de presión de la bomba y también se ve afectado por la viscosidad del líquido bombeado. Sin embargo, la capacidad varía muy poco con la presión de la descarga.

Además de las bombas rotatorias del tipo de engranes, se fabrican de otros tipos diferentes, cada uno de los cuales tiene ventajas especiales según sea la aplicación específica. Los fluidos abrasivos no pueden bombearse adecuadamente en ciertos tipos de bombas rotatorias que tienen holguras muy cerradas; sin embargo, esto no es aplicable para todas las bombas rotatorias. Algunos diseños especiales de bombas helicoidales pueden bombear soluciones que tienen partículas sólidas grandes en suspensión.

Las bombas rotatorias se emplean con mucha ventaja en las plantas de proceso para bombeo de líquidos viscosos difíciles de manejar con bombas centrífugas. Fácilmente pueden bombear fluidos con viscosidades tan altas como de 400 000 centistokes. Las bombas rotatorias se fabrican para presiones de descarga hasta de 5 000 lb/plg^2. Los ingenieros encargados de la selección de bombas debe-

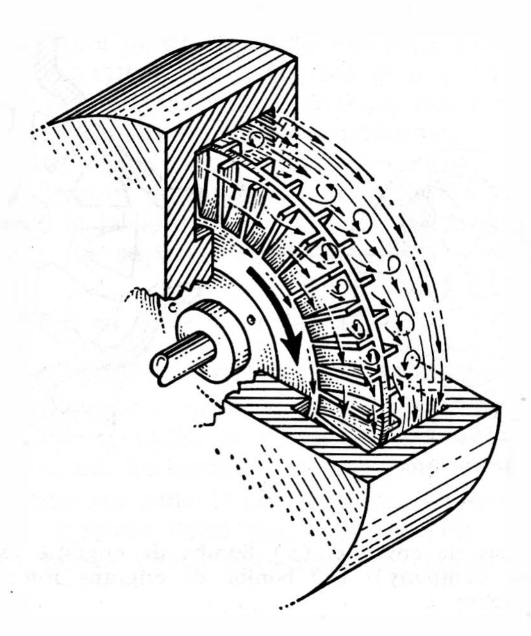


Fig. 14-20. Rodete de bomba periférica; se muestra la trayectoria del flujo.

rán investigar los diferentes diseños de bombas rotatorias, particularmente aquellas que presenten problemas de bombeo en intervalos de baja capacidad (menor de 500 gpm).

BOMBAS PERIFERICAS O "TURBINAS"

Las bombas periféricas o "turbinas" (Fig. 14-20) desarrollan cargas muy altas por la recirculación del líquido en las aletas. De esta manera, aun para capacidades pequeñas, pueden diseñarse bombas para cargas elevadas, teniendo gran aplicación este tipo de servicio.

ESPECIFICACION Y SELECCION DE BOMBAS

La selección de la bomba más apropiada para un determinado servicio requiere de la cooperación de los representantes de los fabricantes. Se usa bastante la hoja de especificación de normas para la presentación ordenada de la información del proceso (Fig. 14-21). Debido a que la hoja de información está escrita en forma abreviada, los ingenieros podrán proporcionar esquemas, o la información adecuada. Deben proporcionarse los detalles completos del problema de bombeo.

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO PARA EL EQUIPO DE BOMBEO			
Proceso diseñado por	PJC	Planta	CPLA-2
Revisado por	RLJ	Espec. Núm.	BR-000
Fecha	3/20/52	Portada Núm.	P-105

GENERALES		
Servicio		Alimentación de hornos
Núm. necesario de bombas	En uso regular	1
	como reserva	1
NECESIDADES DEL PROCESO POR BOMBA		
Fluido bombeado		Gasóleo
Clase de fluido	Corrosivo o no corrosivo	Ligeramente corrosivo
	Compuestos corrosivos	Azufre
	Sólidos (cualquiera)	Ninguno
Gasto bombeado G/H a 60°F y 760 mm		18 350
Densidad a 60°F y 760 mm		0.882
Temperatura de bombeo	°F	150
Viscosidad, centipoises a la temperatura de bombeo		8.5
CONDICIONES EN LA SUCCION (BOMBA)		
Presión	lb/plg² (abs o man)	0 lb/plg² manométricas
Presión vapor a la temperatura de bombeo (abs o man)		Despreciable
Densidad a la temperatura de bombeo y presión de succ.		0.840
Carga positiva neta arriba de presión vapor pies		40.4
CONDICIONES EN LA DESCARGA (BOMBA)		
Presión	lb/plg² (abs o man)	220 lb/plg² manométricas
Densidad a la temperatura de bombeo y presión succión		0.840
Capacidad a las condiciones de descarga		294 GPM
CONDICIONES DE DISEÑO		
Presión diferencial	lb/plg²	220 lb/plg² manométricas
	pies	605
Caballos potencia del líquido		37.7
Temperatura máxima	°F	250
Presión máxima de succión lb/plg² (abs o man)		10 lb/plg² manométricas
ΔP máxima admisible en la bomba lb/plg²		290.2
OBSERVACIONES		
(Necesidades especiales de bombas o motores, etc.)		
Tipo recomendado de bomba		Centrífuga
Tipo de motor recomendado		
Regular		Motor eléctrico
De reserva		Turbina

Fig. 14-21. Forma de especificaciones para el equipo de bombeo. [Reimpreso con permiso de R. L. Jacks, *Chem. Eng. Progr.* *49*, 234 (1953).]

Es muy necesario tomar en cuenta, en los cálculos y diseños, los factores de seguridad adecuados tanto para capacidad como para carga. Con frecuencia ocurre que por usar factores de seguridad arbitrarios se necesita seleccionar una bomba más cara. En estos casos deberá hacerse una reducción al valor del factor de seguridad arbitrario, modificando las condiciones de diseño, a fin de poder seleccionar una bomba menos cara. Teniendo el diseño y las condiciones de operación, el ingeniero que seleccione la bomba, deberá informarle al ingeniero de proyecto.

En la selección de la bomba, también debe considerarse cuál será la bomba que servirá de repuesto, en el caso de que las dos bombas estén trabajando para servicios diferentes.[11] Debe compararse el trabajo por unidad de masa (carga) para cada uno de los servicios, así como también la presión diferencial y la capacidad. Esto es particularmente necesario para bombas centrífugas ya que la carga que desarrolla una bomba centrífuga permanece constante para una capacidad dada y es independiente de la densidad. Desde luego que la bomba de repuesto debe seleccionarse para la condición máxima.

INFORMACION SUMINISTRADA POR EL FABRICANTE

Al fabricante deberá pedírsele el envío de las curvas características, instrucciones para la instalación y operación y los dibujos certificados con las dimensiones de todas las bombas compradas, de tal manera que con esta información se puedan hacer dibujos precisos de los sistemas de tuberías y de las cimentaciones.

INSTALACION DE BOMBAS

Localización

Las bombas deben localizarse tan cerca como sea posible del lugar donde está el fluido que se va a bombear, para reducir la longitud y complejidad de la tubería de succión. Deben proporcionarse espacios libres para servicio de la bomba, tanto por arriba como por sus alrededores. En casos de bombas de pistón, debe dejarse suficiente espacio para poder sacar los pistones y los vástagos. Además, el área que rodea a la bomba debe estar libre de objetos que alteren la seguridad.

Si la bomba está instalada en una caseta, debe proporcionársele cambios adecuados de aire. Si es necesario, deben instalarse ductos especiales de extracción partiendo del prensaestopas de la bomba, sobre todo si se manejan materiales volátiles o venenosos. Siempre que sea posible debe evitarse el uso de casetas para bombas; en general crean gastos y riesgos adicionales sin tener realmente ventajas.

Cuando por razones prácticas deban instalarse las bombas en un lado opuesto del lugar donde están las unidades de un proceso peligroso, debe dejarse una área libre entre la unidad y las bombas, de tal manera que pueda dársele servicio sin interferencias con la operación de la planta.

Esta disposición de arreglos simplifica la instalación de conductos eléctricos y tuberías de vapor necesarios para la bomba, aunque pudiera complicarse el sistema de tuberías de la bomba al proceso y viceversa. Si el sistema de tuberías en el proceso resulta ser muy complicado, pudiera ser preferible colocar una bomba dentro del área de proceso. En general, resulta más factible tener una bomba instalada fuera del área de proceso, para los casos en que la succión se tome de una área y la descarga se efectúa en otra. En caso de que no se tengan riesgos por fuego, las bombas podrán instalarse muy próximas entre sí.

Cimentaciones

Independientemente del tipo de bombas, todas requieren de cimentación para absorber las vibraciones causadas por ellas mismas. Las cimentaciones, por lo general, son de concreto vaciado sobre terreno firme y en casi todos los casos se necesita excavar hasta encontrar terreno firme (véase el Cap. 22). Los cimientos deben sobresalir de la superficie del piso un mínimo de un pie. Cuando se tienen varias bombas alineadas, es muy común que todos los cimientos sobresalgan del piso a la misma altura. Sin embargo, si las bombas son de diferentes tamaños, las alturas de los cimientos por encima del piso serán diferentes para poder tener todas las líneas de centros de las bombas a la misma altura. Cuando todas las bombas están arregladas en esta forma su servicio se facilita mucho.

Los cimientos de concreto vaciado deben tener el tiempo adecuado para su curado antes de la instalación de la bomba. Se deja un espacio de aproximadamente una pulgada entre la superficie del cimiento y la placa de la base de la bomba para efectuar la colocación de la lechada. El fabricante de bombas especifica el diámetro de los tornillos de cimentación, los que deben ser de suficiente longitud (es preferible que estén sobrados en longitud ya que después podrán cortarse) para que puedan adherirse firmemente al cimiento. Los tornillos se colocan en tubos cuyo diámetro es de tres a cuatro veces el diámetro del tornillo; con esto se permite el movimiento del tornillo para adaptarse a los agujeros de la placa de la bomba.

Después de haber alineado la bomba, se inyecta por abajo de la base de la misma un mortero fino consistente de una parte de cemento y dos partes de arena y agua suficientes para formar una masa plástica fluida. Esta operación se llama lechada y asegura firmemente la placa base de la bomba al cimiento. Para poder colocar fácilmente la lechada, se coloca un cerco de madera alrededor de

la placa base de la bomba. El aire que hay bajo la base se escapa a través de los agujeros que tiene la placa base, pudiendo, además, hacer apisonamiento de la mezcla de la lechada a través de los mismos.

Alineamiento

El fabricante proporciona con detalle las instrucciones para el alineamiento de cualquier tipo de bomba, el que es esencial para asegurar el trabajo satisfactorio de la misma. El alineamiento final deberá revisarse bajo condiciones de operación, en caso de que las condiciones de temperatura sean diferentes para el motor o turbina y la bomba. Durante el alineamiento inicial deberán darse las tolerancias necesarias.

Tuberías de succión y de descarga

Se deben tomar las precauciones necesarias en el diseño de las tuberías de las bombas para aceite caliente, a fin de que ninguna fuerza originada por la expansión de la tubería vaya a afectar la cubierta de la bomba. Mediante un arreglo adecuado de tuberías, se podrá lograr libertad de expansión de las mismas, de tal modo que en ciertos casos no será necesario usar juntas de expansión, las que son muy caras. Las tuberías de succión y de descarga deben anclarse o soportarse de tal modo que la cubierta de la bomba no tenga que soportar los empujes originados por la expansión.

Las tuberías de succión deben ser lo más corto posible y diseñarse para que las pérdidas por fricción sean mínimas. Esto se logra usando tubería de diámetro adecuado (por lo general, de una a dos veces* mayor que el diámetro de la tobera de succión de la bomba), codos de radio grande y debe tener un número mínimo de vueltas.

Deben evitarse las cavidades en las tuberías de succión de las bombas centrífugas, ya que en ellas se pueden acomodar aire o gas. En las toberas de succión deben usarse uniones o tubos de reducción excéntricos con pendiente hacia abajo, de tal manera que eviten la formación de cavidades.

Si la bomba está colocada abajo de la fuente, deberá dársele a la tubería de succión una pendiente de ¼ de pulgada por pie de longitud (esto de ser posible) y pendiente en dirección opuesta cuando la bomba está por encima de la fuente. Para bombas de doble succión, los codos deben instalarse en tubo vertical ya que cuando se instalan en tubo horizontal o inclinado no se logra tener igual distribución de flujo a los lados del rodete. Solamente para el caso de que la bomba disponga de tubos múltiples o distribuidores en paralelo, no se usará válvula de compuerta en la tubería de succión.

* Esto es obviamente empírico. El diámetro debe calcularse de acuerdo a las pérdidas por fricción y a la NPSH requerida.

Sin embargo, es deseable usar filtros de área transversal, aproximadamente de tres a cuatro veces el área de la tubería de succión, sobre todo cuando la planta inicia por vez primera su operación, porque pudiera haber materia extraña alojada en la tubería. Al usar válvula de compuerta en la tubería de succión, es recomendable que el vástago se instale horizontalmente para evitar que se acumule vapor en la parte superior de la válvula. Esta práctica, aun cuando frecuentemente se recomienda, por lo general no se sigue.

Para tener un mínimo de turbulencia, deberá usarse tubería recta de longitud mínima igual a tres veces el diámetro del tubo de succión, desde el último codo hasta la tobera de succión.

Si se usan cabezales de succión para un grupo de bombas trabajando en paralelo, éstos deberán diseñarse para que la velocidad sea igual en todos los puntos (esto para tener aproximadamente iguales caídas de presión para todas las trayectorias y asegurar una mejor distribución).

La tubería de descarga puede ser menor que la tobera de descarga, pero algunas veces podrán ser iguales. La carga aprovechable y las consideraciones económicas decidirán el diámetro que deba usarse (véase el Cap. 18). Las velocidades en estas tuberías varían de 3 a 15 pies/seg.

Se debe colocar una válvula de retención entre la tobera de descarga y la válvula de compuerta para evitar que el líquido retroceda en caso de que la bomba falle.

Para las bombas de desplazamiento positivo, debe instalarse una válvula de alivio entre la bomba y la válvula de compuerta. Esta debe abrirse al haber un exceso de 10% de la presión máxima de trabajo de la bomba. La válvula de alivio no es necesaria en las bombas de pistón accionadas con vapor en las que la presión de estallido es menor que la presión máxima admisible en el cilindro del líquido.

Las bombas que tienen bridas de cara plana requieren el uso de bridas compañeras también de cara plana, de acuerdo a las especificaciones de la tubería.

Tuberías auxiliares

Particularmente para las bombas centrífugas, las tuberías auxiliares (agua de enfriamiento y tuberías de aceite para el collarín del prensaestopas) son muy pequeñas, pero son extremadamente importantes. Los fabricantes sugieren que se ponga mucha atención a las recomendaciones que se dan para esta fase del sistema. Todas las válvulas deben estar muy accesibles y la disposición de la tubería deberá ser tal que no dificulte el servicio e inspección de la bomba.

Deben instalarse tuberías para el drenado de la caja del prensaestopas y de cualquier otra parte de la bomba que lo necesite. Por lo general, todos estos desechos se colectan en un resumidero que es

común para todas las bombas, desde donde son bombeados y controlados automáticamente usando una bomba de sumidero.

REFERENCIAS

1. Addison, Herbert, *Centrifugal and Other Rotodynamic Pumps*, Chapman y Hall, Ltd., Londres, 1948.
2. Carter, R., I. J. Karassik y E. F. Wright, *Pump Questions and Answers*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1949.
3. Church, A. H., *Centrifugal Pumps and Blowers*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1944.
4. Finch, V. C., *Pump Handbook*, National Press, Milbrae, Calif., 1948.
5. Jacks, R. L., *Chem. Eng. Progr.*, 49, 234 (1953).
6. Kent, R. I., *Mechanical Engineer's Handbook II*, 11a. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1936.
7. Kristal, F. A. y F. A. Annett, *Pumps*, 2a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1953.
8. Nickel, F. F., *Direct Acting Steam Pumps*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1915.
9. *Standards of the Hydraulic Institute*, 10a. Ed., Hydraulic Institute, New York, 1955.
10. Stepanoff, A. J., *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
11. Taylor, Irving, *Chem. Eng. Progr.*, *44*, 336 (1948).

CAPITULO 15

COMPRESORES Y BOMBAS DE VACIO

El transporte de gases y vapores es tan importante como el movimiento de líquidos. En muchas plantas químicas algunos procesos requieren alimentación de gases comprimidos a presiones elevadas. La estación de compresores es una planta dentro de otra planta, que tiene máquinas complicadas y caras, que requieren no únicamente de operación práctica sino también de los conocimientos de la ingeniería para su selección e instalación. Generalmente, los fabricantes de compresores proporcionan al cliente, o a un cliente en prospecto, los servicios de sus ingenieros para ayudarles en la selección de sus unidades. Sin embargo, el ingeniero de proyecto debe tener ciertos conocimientos fundamentales que le permitan hacer preguntas pertinentes y sostener conversaciones inteligentes con el fabricante.

Al igual que para bombas, se tiene una lista similar de los tipos de compresores. Sin embargo, el diseño de los compresores es más complicado debido a la compresibilidad de los gases. Mientras que el uso de la bomba de pistón ha declinado en proporciones relativamente pequeñas, el compresor de pistón sigue siendo muy usado para compresión de todos los gases, aunque a partir de 1945 el uso de compresor centrífugo se ha incrementado notablemente.

COMPRESORES DE PISTON

Brevemente, el Compressed Air and Gas Institute[3] define al compresor de pistón como una máquina en la que el elemento compresor es un pistón con movimiento alternativo dentro de un cilindro. De-

bido a que actualmente son muchos los tipos de compresores de pistón que se fabrican, resulta difícil preparar una lista racional de los tipos generales. El Compressed Air and Gas Institute sugiere la siguiente lista: *

1. *Acción simple.* La compresión se efectúa solamente en el extremo de un cilindro.

2. *Acción doble.* La compresión ocurre en ambos extremos de los cilindros.

3. *Un solo paso.* La compresión desde un estado inicial al final ocurre en cada embolada de trabajo del pistón.

4. *Pasos múltiples.* El gas se comprime en el primer cilindro desde la presión inicial hasta una presión intermedia y se completa en uno o más cilindros subsecuentes.

5. *Vertical.* El elemento de compresión está en posición vertical.

6. *Horizontal.* El elemento de compresión está en posición horizontal (es el más común en las industrias de proceso).

7. *Angulo.* Son compresores multicilíndricos, formando cada uno de los ejes de los cilindros un determinado ángulo entre sí (este tipo es muy común, particularmente en compresores de aire pequeños y portátiles). Esta terminología está basada únicamente en los cilindros de los compresores. El término ángulo se refiere a máquinas grandes conectadas directamente y en las que los cilindros del compresor están horizontales y los cilindros de fuerza forman un determinado ángulo con los cilindros del compresor (véase más adelante).

8. *Línea recta.* (Marco simple.) Son unidades horizontales o verticales con marco o estructura simple, teniendo uno o más cilindros en línea.

9. *Duplex.* Son dos cilindros en paralelo conectados a un cigüeñal común.

10. *Enfriados por aire.* Enfriados por aire atmosférico natural o por aire que está en circulación (sólo para compresores pequeños).

11. *Enfriados por agua.* El agua circula a través de chaquetas que rodean a los cilindros (casi todos los compresores de proceso).

Los compresores multicilíndricos de alta velocidad se empezaron a usar a principios de 1940; son muy comunes en las plantas de proceso, pero su complejidad hace inadecuada en muchos aspectos, la terminología anterior. Resulta preferible describir a los compresores de los procesos modernos en base al tipo de propulsión.

Tipos de compresores de pistón

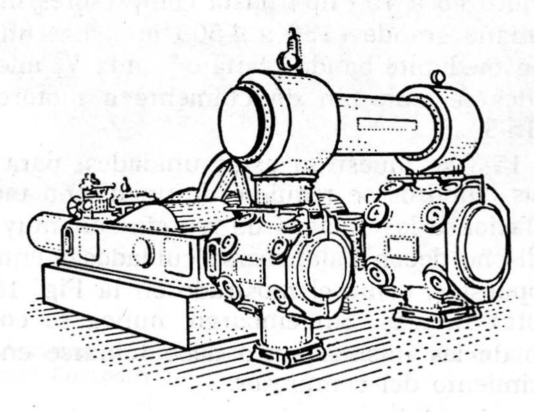
Accionados con vapor y conectados directamente

La mayoría de los primeros compresores que se instalaron fueron unidades accionadas con vapor. El uso de estas unidades se ha reducido a instalaciones pequeñas (10-300 hp) de baja presión, a unidades de un solo paso o a unidades tándem de dos pasos, los que producen presiones máximas de aproximadamente 150 lb/plg^2 y 500 lb/plg^2, respectivamente. Estos compresores trabajan de 250 a 500 rpm y se emplean más como compresores de aire. El empleo

* Reimpresa con permiso de *Compressed Air Handbook*, 2a. Ed. Compressed Air and Gas Institute, McGraw-Hill Book Co., N. Y. (1954).

de vapor por un extremo del cilindro es similar a las bombas de pistón accionadas con vapor.

Los compresores más grandes (200 hasta 1 500 hp) accionados con vapor, generalmente son horizontales, tipo duplex, en diseños de un solo paso o de pasos (Fig. 15-1). Estos se fabrican para presiones altas, hasta 5 000 lb/plg². La selección de estas unidades depende principalmente de la disponibilidad de vapor que se tenga



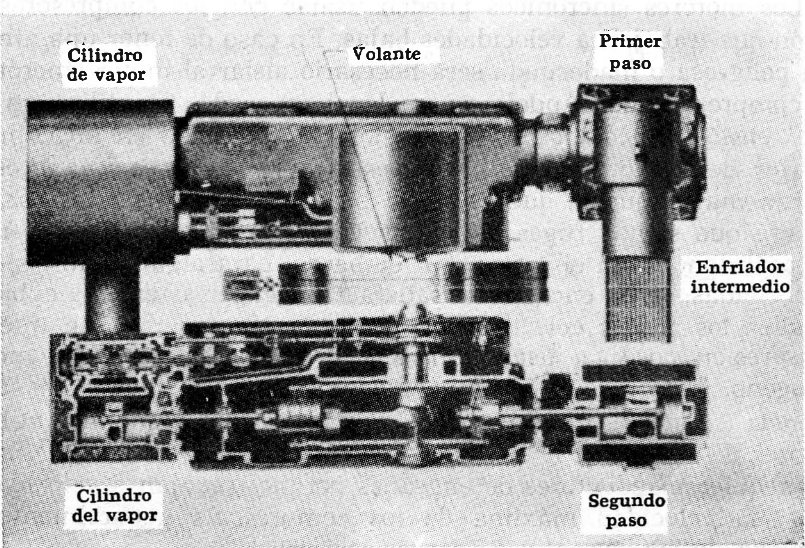


Fig. 15-1. Vista de planta e isométrica de un compresor de pistones de dos pasos accionado con vapor. (Fotografía por cortesía de Ingersoll-Rand Company. Isométrico adaptado con permiso.)

en la planta. Una desventaja de los compresores grandes accionados con vapor es la superficie de paso relativamente grande que ocupan dichas unidades; esto probablemente haya influido para su decli-

nación, junto con la introducción de compresores impulsados por motores de gas y por lo barato del gas natural (véase Fig. 15-1).

Propulsión con motor eléctrico

Hay una gran variedad de compresores de pistón impulsados por motor eléctrico en intervalos que varían desde modelos pequeños de un solo cilindro (5 a 150 hp) hasta compresores multicilíndricos opuestos de tamaño grande (150 a 4 500 hp). Las unidades pequeñas se accionan mediante banda plana o banda V, mientras que las unidades grandes se conectan directamente a motores sincrónicos (Figs. 15-2 y 15-3).

En la Fig. 15-3 se muestran estas unidades; para las unidades de cuatro a seis cilindros se requiere de un diseño muy cuidadoso. En estas instalaciones las fuerzas de inercia son muy grandes, por lo que en su diseño deben balancearse cuidadosamente. Un arreglo con cilindros opuestos, como el mostrado en la Fig. 15-3, minimiza el efecto de estas fuerzas. Sin embargo, nunca se consigue el balance completo de las mismas; esto debe tomarse en cuenta para el diseño del cimiento del compresor.

Los motores sincrónicos pueden usarse con los compresores de pistón que trabajan a velocidades bajas. En caso de tener una atmósfera peligrosa o inadecuada será necesario aislar al motor sincrónico del compresor, instalándolo en un local separado. Se utiliza un eje de extensión conectado al eje del motor y soportado en un cojinete exterior del motor. El local debe estar ventilado y a una presión interna mayor que la que se tenga en el cuarto del compresor, de manera que si hay fugas de aire y gases, éstas sean hacia afuera del local donde está el motor. Sin embargo, para algunas atmósferas inadecuadas, se ha encontrado satisfactorio encerrar en una cubierta metálica los anillos colectores del motor y mantener en su interior una presión positiva, usando para ello un gas inerte tal como el nitrógeno. Este arreglo es conveniente para instalaciones de baja potencia (menos de 450 hp); para ello resulta más económico utilizar motores de inducción a prueba de explosión. Los motores de inducción requieren reductores de engranes porque trabajan a velocidades altas (la velocidad máxima de los compresores generalmente es alrededor de 500 rpm).

Propulsión con turbinas

Para los compresores descritos anteriormente, pueden emplearse, para su impulsión, turbinas de vapor en lugar de motores eléctricos. Las turbinas de vapor se usan cuando los costos de la energía eléctrica son muy altos y los de vapor son bajos.

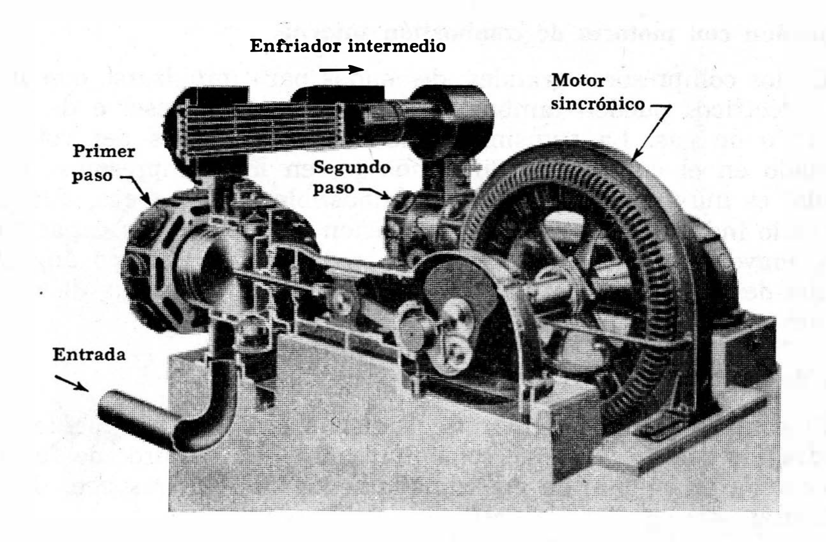


FIG. 15-2. Compresor de dos pasos impulsado por motor sincrónico. (Cortesía de Ingersoll-Rand Company.)

Válvulas de alivio
Postenfriador
Tablero de control
Válvula de alivio
Enfriador intermedio

Tambor deshidratador
Cabezal de descarga
Motor sincrónico
Bomba de aceite para lubricación
Cabezal de succión

FIG. 15-3. Instalación de un compresor multicilíndrico típico accionado por motor eléctrico. (Cortesía de Cooper-Bessemer Corporation.)

Propulsión con motores de combustión interna

En los compresores grandes, diseñados para impulsarse con motores eléctricos pueden también utilizarse motores diesel o de gas-diesel* o de gas. La transmisión se efectúa a través del volante instalado en el compresor. Sin embargo, en los compresores "tipo ángulo" es muy conveniente usar combustible diesel, o gas, cuando esto es lo indicado. Para ciertas aplicaciones de presión y capacidad altas, mayores que las que se tienen en las unidades "tipo ángulo" (arriba de 2 500 hp), es necesario conectar las máquinas de combustión a motores tipo unidad.

Tipo de ángulo

El compresor tipo angular tiene dispuestos horizontalmente los cilindros de compresión, que son impulsados por cilindros de fuerza colocados a un ángulo de aproximadamente 90° con respecto de la horizontal.

Los primeros motores de gas fueron simplemente compresores de vapor modificados. Fueron mejorados durante los años de la década de 1920 en los que se efectuaron muchas instalaciones de grandes compresores horizontales de 4 ciclos, impulsados por motores que usaron gas como combustible. Algunos fabricantes siguen actualmente producienlo estas unidades, pero su uso ha declinado por la introducción del compresor tipo angular.

Quizá uno de los desarrollos más espectaculares en el diseño de compresores tuvo lugar a fines de la década de 1930 y a principios de la de los 1940 cuando se introdujo el compresor tipo angular de 2 ciclos accionado por motor de gas. Aparentemente se tuvieron tres ventajas sobre sus predecesores horizontales de velocidad baja; principalmente, eficiencia térmica alta, menor espacio requerido (aproximadamente la mitad) y menor costo por caballo instalado.

Se tienen dos diseños de compresores tipo angular. Uno es el llamado "ángulo recto" (Fig. 15-4) en el que los cilindros de fuerza están colocados lado a lado; ofrecen la ventaja de la fácil accesibilidad de todos los cilindros de fuerza. Un segundo tipo es en ángulo V en el que los cilindros de fuerza están arreglados en V (Fig. 15-5) los que tienen la ventaja de disponer de más cilindros por unidad de longitud de la máquina. Ambos tipos han dado excelente servicio y han resultado de uso muy popular. El tipo "a ángulo recto" tiene 5, 6, 8 o 10 cilindros de fuerza y el tipo "a ángulo V" tiene 6, 8 o 10 cilindros. Ambos tipos consumen de 250 a 300 hp por cilindro. Las velocidades de operación son aproximadamente de 300 rpm y muchos de ellos tienen de seis a siete pasos de compresión incorporados en el mismo compresor.

---

* Los motores de gas-diesel pueden trabajar ya sea con combustible gas o diesel y es lo indicado a usarse en aquellos lugares donde se dispone de gas que está expuesto a interrupciones.

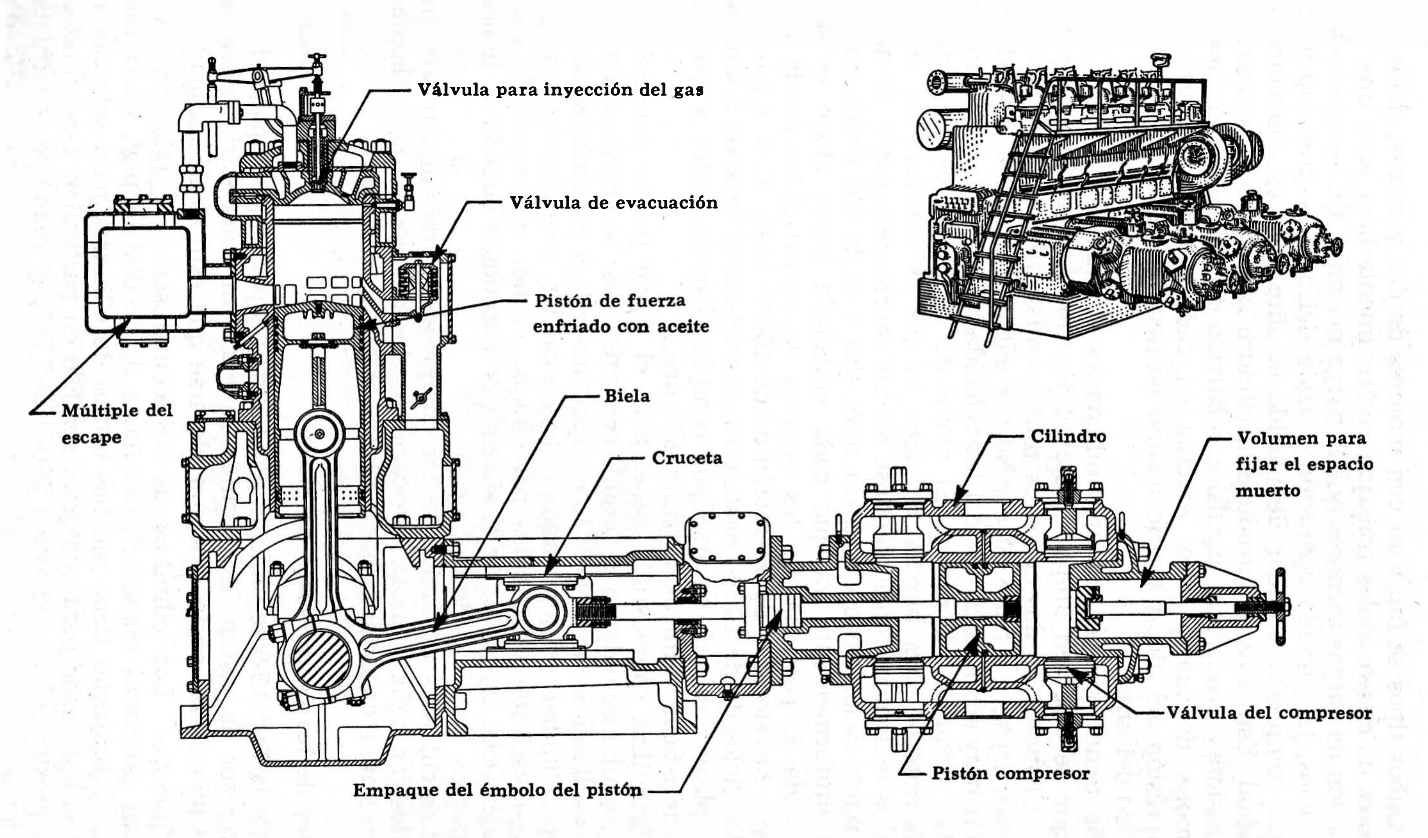


FIG. 15-4. Sección transversal y vista isométrica de un compresor tipo ángulo recto accionado con motor de gas. Sección cortesía de Clark Brothers Company, isométrico adaptado con permiso.)

Ambos tipos se fabrican con motores de dos y cuatro ciclos. Los motores de cuatro ciclos trabajan perfectamente bien para una gran variación de cargas menores que la carga nominal. En los motores de dos ciclos, la llamada operación barrido del aire es precomprimida en un compresor auxiliar de barrido de aire, que es conectado al cigüeñal. Este aire se introduce al cilindro al final de la carrera de expansión y ayuda a la expulsión o barrido de los gases remanentes. El motor de cuatro ciclos efectúa en cada cilindro la entrada y compresión del aire y por lo mismo no necesita de compresor para barrido del aire.

Se tienen ciertas ventajas inherentes a cada uno de los tipos, las que se discuten ampliamente en los libros de ingeniería mecánica. El motor de dos ciclos es muy popular debido a que necesita de poco espacio y tiene poco peso por caballo instalado, además de operar muy económicamente a las velocidades bajas que se requieren en las máquinas de pistón. El motor de cuatro ciclos no requiere de compresor para barrido del aire, lo que es aprovechado en los diseños recientes, consiguiéndose así un ahorro de espacio. El motor de cuatro ciclos tiene eficiencia muy alta y el de dos ciclos trabaja más uniformemente ya que cada embolada hacia abajo es una embolada de potencia. En los motores de cuatro ciclos puede controlarse la velocidad de operación desde 100% hasta 50% y para los de dos ciclos desde 100% hasta 60%. La selección final de la unidad a emplearse deberá basarse por comparación de costos y por las características técnicas correspondientes.

Se utiliza combustible diesel para el motor de los compresores tipo angular cuando no es posible conseguir gas. Se emplean motores de gas-diesel si se tienen interrupciones en el suministro de gas (disponibilidad de temporada). Los modelos propulsados por gas o gas-diesel son encendidos por chispa, usando elementos de bajo voltaje. Debe especificarse el sistema de encendido cuando se tienen riesgos en las áreas de trabajo.

Los cilindros de fuerza de los compresores tipo angular son enfriados con agua. Para la lubricación de los mismos se utiliza bomba de engranes conectada directamente al cigüeñal.

Partes de los compresores de pistón

En la Fig. 15-5 se indican algunas de las partes principales de un compresor de pistón. En seguida se hará un comentario breve de cada una de las partes por considerarse que esto es de utilidad.

Cilindro. Los cilindros de los compresores se fabrican para resistir presiones manométricas hasta de 25 000 lb/plg². Cada uno de los fabricantes tiene muchos estilos de cilindros para seleccionar al más apropiado para cualquier servicio en particular. Los cilindros para presiones bajas (hasta 1 200–1 500 lb/plg² man) se construyen de hierro fundido o de semiacero (hierro fundido de alta calidad).

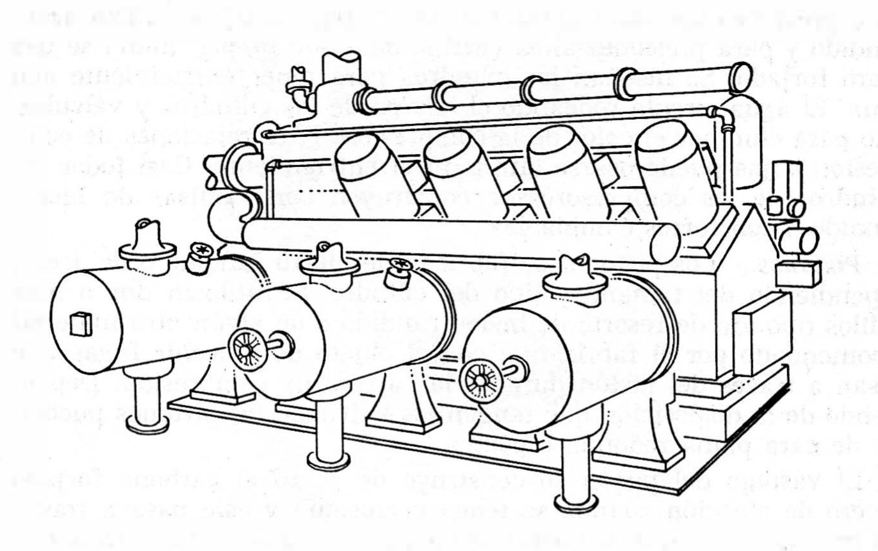


FIG. 15-5. Compresor en ángulo V, accionado con motor de gas. (Corte transversal. Cortesía de Cooper-Bessemer Company. Isométrico adaptado con permiso.)

Para presiones medias (1 500 a 2 500 lb/plg² man) se utiliza acero fundido y para presiones altas (arriba de 2 500 lb/plg² man) se usa acero forjado. Se diseñan los cilindros para tener enfriamiento con agua. El agua circula rodeando el cuerpo de los cilindros y válvulas, esto para eliminar el calor de la compresión. Para relaciones de compresión bajas puede usarse aire para el enfriamiento. Casi todos los cilindros de los compresores se construyen con camisas de hierro fundido o con forros cambiables.

Pistones. Los pistones se fabrican de hierro fundido o de acero, dependiendo del tamaño y tipo del cilindro. Se utilizan dos o más anillos tipo aro de resorte de hierro fundido o de algún otro material recomendado por el fabricante, con el objeto de prevenir fugas que pasan a través del pistón durante la carrera de compresión. Dependiendo de la disposición que tengan las válvulas, los pistones pueden ser de cara plana redonda o cónica.

El vástago del pistón se construye de acero al carbono forjado (acero de aleación cuando se tenga corrosión) y éste pasa a través del prensaestopas que se enfría con agua, en el que se tiene empaque metálico o anillos de cierta composición o algún otro material para el empaque. En el extremo de la manivela se tiene un empaque que actúa a modo de rozador para minimizar las pérdidas de aceite por el extremo de la manivela. En los compresores grandes, el empaque que se tiene inmediatamente después del cilindro es de lubricación forzada. El soporte del cilindro está constituido por una cámara contigua al cilindro compresor la que está ventilada para extracción de los gases peligrosos que se tengan en el prensaestopas, mismos que puedan extraerse fuera del área de trabajo.

Válvulas del compresor. En 1915 con la introducción de válvulas de succión y descarga para presiones altas hicieron factible el desarrollo del compresor moderno. Se tienen muchos tipos diferentes de válvulas. Esencialmente todas trabajan de acuerdo al mismo principio. La diferencia de presión a través de la válvula causa desprendimientos metálicos que pueden ocasionar una serie de aberturas concéntricas o paralelas de forma rectangular. Para ciertos diseños se necesita de una diferencia de presiones para efectuar el movimiento del disco de la válvula, para vencer las fuerzas de oposición debidas a resortes (helicoidales o de hoja) o a pesos que se tienen en el sistema. Estas fuerzas amortiguan la acción de las válvulas.

La válvula que se muestra en la Fig. 15-6 consiste en un disco de acero delgado con un cierto número de ranuras paralelas. Los discos son muy flexibles y se abren o se cierran dependiendo de la diferencia que se tenga a través de la válvula. Por ejemplo, los discos de las válvulas de succión se abren cuando la presión en la tubería de succión es mayor que la presión que se tiene en el cilindro.

El diseño de la válvula debe ser tal que ésta se pueda abrir y cerrar suavemente, y que proporcione suficiente área de paso que

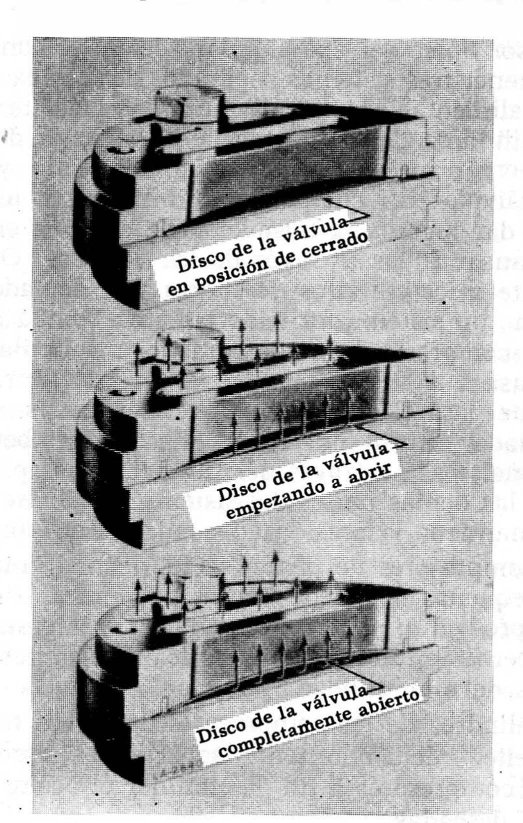


FIG. 15-6. Válvula del compresor. (Cortesía de Worthington Corporation.)

permita el paso de gas a baja velocidad. Algunas veces es deseable emplear válvula de doble cubierta, lo cual es simplemente tener dos válvulas, una montada encima de la otra y arregladas para operar en paralelo. Este diseño aumenta el área efectiva de la válvula y reduce las pérdidas en la misma. Esta válvula es particularmente deseable para capacidades grandes y baja relación de compresión donde las pérdidas a través de la válvula pueden ser de valor alto en comparación a las necesidades de potencia.

Las partes de las válvulas se construyen de acero al carbono, acero inoxidable o de aleación de cromo, dependiendo del tipo de válvula, condiciones de operación y de la naturaleza corrosiva del gas.

Lubricación de los compresores de pistón

La lubricación adecuada de un compresor de pistón es un problema muy complicado, debiéndose atender con cuidado las recomendaciones tanto del fabricante del compresor como de la de los especialistas en lubricación.

Un compresor típico del tipo angular accionado con motor de gas o diesel puede tener tres sistemas separados de lubricación. Un lubricador del tipo alimentación forzada suministra aceite de flujo controlado a los cilindros del compresor y al vástago del pistón. Sus funciones son crear un sello efectivo en el pistón y proteger las partes de las válvulas del compresor. Sin embargo, tener aceite en demasía puede dar lugar a la formación de carbono en las válvulas lo que puede causar fugas a través de las válvulas. Otro lubricador suministra aceite a los cilindros de fuerza y al soplador de barrido. Además, se tiene un sistema formado por una bomba accionada por el cigüeñal del compresor la que mantiene en circulación al lubricante, el que pasa a través de un filtro y un enfriador. Este sistema suministra aceite para el cigüeñal, cojinetes y bielas, sirviendo además como enfriador al pistón de fuerza. El aceite es bombeado desde abajo del cigüeñal, pasa a través del filtro, después por el enfriador y finalmente a las demás partes del sistema. Mediante un regulador de presión se mantiene la presión adecuada en el lubricante.

Todos los compresores de pistón se lubrican de manera similar. En unidades pequeñas se pueden combinar ciertos flujos de lubricantes. El Compressed Air and Gas Institute[12] da algunas sugerencias muy valiosas acerca de lubricantes, pero los fabricantes proporcionan especificaciones de más utilidad.

Todos los cilindros de los compresores de pistón necesitan lubricantes con aceite,* debiendo tener separadores apropiados en la descarga de los compresores a fin de eliminar el aceite que no reúna las condiciones deseadas.

Regulación en los compresores de pistón

El gas entregado por un compresor de pistón debe ser regulado por un o por una combinación de varios métodos. El método a usar depende principalmente del tipo de motor utilizado. En casi todos los procesos la regulación se basa en mantener constante la presión en la descarga o en la succión. El que sea la presión de succión o de descarga, depende del proceso para el que el compresor fue seleccionado. Con frecuencia en algunas plantas de proceso es deseable mantener constante la presión en la descarga del compresor; en este caso la presión de descarga debe usarse como elemento sensible. Algunas veces es preferible tener control en la presión de succión cuando ésta tiene un valor mayor que la presión atmosférica.

Control de arranque y paro. Es comúnmente empleado en los compresores de aire; se tiene un interruptor de presión que arranca al motor cuando la presión del aire baja hasta un valor menor que

* Es posible obtener a un costo adicional cilindros especiales no lubricados que tienen pistolas ajustables con anillos de carbón; esto solamente se justifica cuando los gases comprimidos no deban estar en contacto con el aceite.

el requerido, y para al motor cuando se alcanza el valor de la presión deseada.

Control de la velocidad del equipo propulsor. Se controla la variación de la velocidad de los motores de acción directa accionados con vapor por medio de reguladores del tipo de estrangulamiento o con válvulas de vapor automáticas. Los compresores accionados con motores gas-diesel o diesel se controlan desde un 100% hasta un 50 o 60% por medio de un regulador (pueden ser accionados en forma automática) que actúa controlando la cantidad de combustible admisible en los cilindros de fuerza. Este tipo de control es completamente adecuado para casi todos los procesos, aun cuando el dispositivo de descarga de las válvulas de succión y la regulación del espacio muerto, descritos más abajo, proporcionan funcionamiento más uniforme cuando son variables las presiones de la succión o de la descarga. Este último sistema de control es el indicado para tener un control automático rápido.

Regulación del espacio muerto. En las Figs. 15-4 y 15-5 se muestra un sistema de regulación del espacio muerto para los cilindros de un compresor. Las válvulas pueden ser operadas en forma manual o automática. Al abrirse las válvulas se aumenta el espacio muerto, reduciéndose la capacidad del compresor. York[14] demostró que aun cuando la eficiencia volumétrica se reduce al aumentar el espacio muerto, la eficiencia de la compresión no se afecta (el gas en el espacio muerto es comprimido, pero regresa su energía durante la reexpansión). Ya sea que los compresores estén o no diseñados para regulación del espacio muerto, se tienen una especie de tapones que permiten cambiar manualmente la capacidad del compresor si las condiciones de operación están permanentemente cambiando.

Dispositivo de descarga de la válvula de succión. El dispositivo de descarga de la válvula de succión que se muestra en la Fig. 15-7 (Núm. 2 y Núm. 3) mantiene abiertas las válvulas de succión mediante el movimiento de elementos que están sujetos a los pistones de los dispositivos de descarga los que operan neumáticamente. Esta acción impide la compresión del gas correspondiente a la carrera en la que actúa el dispositivo de descarga, reduciendo, por lo tanto, la capacidad del compresor.

Control escalonado. Para compresores pequeños se utiliza el control de cinco o de tres etapas; esto se aplica a compresores accionados con motor de velocidad constante. La capacidad se controla en cinco (100, 75, 50, 25, 0%) etapas o en tres (100, 50, 0%) en caso de usarse con válvulas de regulación del espacio muerto o con dispositivos de descarga de las válvulas de succión o con una combinación de ambos. En la Fig. 15-7 se muestra un control típico de cinco etapas que muestra dos dispositivos de descarga y un regulador del espacio muerto correspondientes a un cilindro de acción

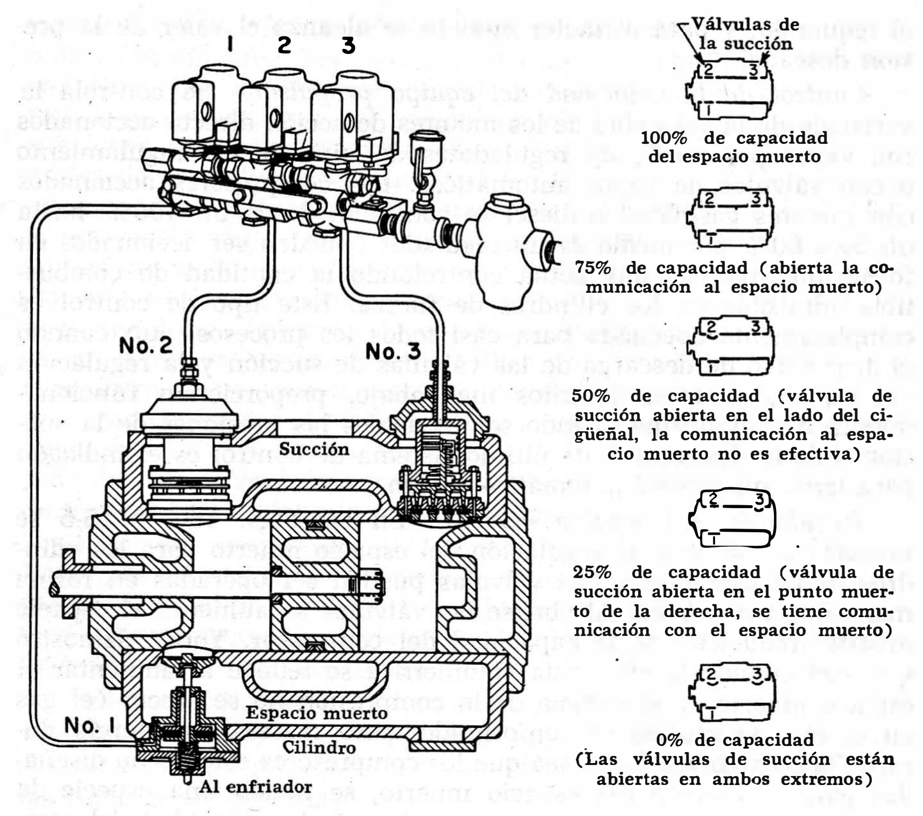


Fig. 15-7. Control del espacio muerto en cinco etapas. (Cortesía de Worthington Corporation.)

doble. El regulador es actuado por el regulador de la presión de descarga del compresor. El regulador selectivamente energiza o desenergiza a uno o más de los solenoides que controlan el aire de los dispositivos de descarga (Núm. 2 y Núm. 3) o de las válvulas reguladoras del espacio muerto (Núm. 1). Se necesita descarga completa para la puesta en marcha de las unidades accionadas con motor sincrónico.

Selección del equipo motriz para compresores de pistón

La selección del tipo de compresor de pistón para una planta determinada, depende principalmente del tipo de propulsor que se tenga y de las facilidades que se tengan en la planta respecto a energía eléctrica y combustible. Antes de hacer la decisión deben compararse los costos del combustible, vapor y energía eléctrica. Cada caso será diferente. Si los costos de energía eléctrica son extremadamente bajos, deberá usarse motor eléctrico. Se pueden obtener

compresores de todos los tamaños accionados por motor eléctrico y no debe pasarse por alto la ventaja de disponer energía a bajo costo justamente por el hecho de que en diferentes partes del país se tengan otros tipos de equipo propulsor.

En particular, resulta muy ventajoso usar compresores accionados por motor de gas en refinerías y plantas petroquímicas, en donde el gas suministrado es obtenido del mismo proceso después de haberle sustraído algunos compuestos pesados. También es muy ventajoso usar motores de gas en aquellas plantas químicas que disponen de gas en forma continua. Puede considerarse adecuado el uso de motores de gas-diesel en aquellos lugares donde el gas se adquiere a precio bajo durante los meses del verano.

Algunas veces resulta adecuado usar compresores accionados con vapor cuando éste puede obtenerse a bajo costo,* o bien cuando debe usarse vapor de baja presión en algún proceso y que se obtenga de la turbina que impulse al compresor. En la decisión que se tome no debe pasarse por alto el costo de los engranes reductores de velocidad y de la tubería de vapor. En instalaciones de compresores chicos y de tamaño medio, resulta algunas veces ventajoso usar vapor como medio directo de propulsión. Es muy importante hacer un estudio económico combinando el aspecto ingenieril y las facilidades de operación de los diferentes tipos de equipos propulsores a usarse en una planta en particular.

Compresores de pistón en locales peligrosos

Tal como se discutirá en el Cap. 24, el equipo de procesos industriales en áreas que ofrezcan algún peligro, deberán estar diseñados a prueba de explosión. Este diseño prácticamente es imposible en compresores accionados con motores de gas o diesel o motores sincrónicos. En estos casos el diseño a prueba de explosión resulta prohibitivo; sin embargo, es factible proteger estas unidades contra algunos riesgos usando bujías protegidas para los motores de gas, y para los motores sincrónicos aislar los anillos colectores con un gas inerte o efectuar purgas de aire.

COMPRESORES Y VENTILADORES CENTRIFUGOS Y AXIALES

Clasificación y terminología

Por conveniencia, la Compressed Air and Gas Institute[13] ha hecho la siguiente clasificación de máquinas centrífugas y axiales:

1. *Sopladores* (turbo-sopladores). La presión manométrica de la descarga menor a 40 lb/plg² (basada en el aire).

---

* Desafortunadamente los costos en plantas de vapor con frecuencia no son realistas, de modo que no reflejan las condiciones reales.

2. *Compresores* (turbo-compresores). La presión de la descarga menor a 40 lb/plg².

3. *Ventiladores.* Church[2] los define como máquinas centrífugas de velocidad baja que manejan grandes volúmenes a presiones manométricas muy bajas, menores a 1 lb/plg².

Gran parte de la terminología que se usa en máquinas centrífugas es la misma que ya se presentó para las bombas centrífugas, por lo que se harán solamente los siguientes comentarios en forma breve:

1. *Paso simple.* Un rodete o sólo una hilera de aletas o álabes.
2. *Pasos múltiples.* Dos o más rodetes o hileras de aletas o álabes.
3. *Centrífugos.* Tienen rodetes radiales y el flujo pasa a través de la máquina en dirección axial. Estos rodetes pueden ser abiertos, semicerrados o cerrados. Los álabes pueden ser rectos o curvados hacia atrás. En las unidades de pasos múltiples se tienen difusores, localizados entre los diferentes pasos a fin de obtener una conversión más eficiente de la carga de velocidad a carga de presión (Fig. 15-8).
4. *Axial.* El flujo de gas es la dirección axial. Su movimiento es originado por álabes que están fijos a un disco que tiene rotación (Fig. 15-9). Se tiene una hilera de álabes fijos que separan a cada hilera de álabes en rotación que actúan de la misma manera que los difusores en las máquinas centrífugas.
5. *Grupo simple.* Definido por el Air and Gas Institute como cualquier grupo de rodetes o difusores separados, que trabajan como una unidad acoplada en el mismo eje, con cubierta simple y sin enfriamiento entre los rodetes.
6. *Grupo de pasos múltiples.* Cuando se tienen dos o más grupos de pasos accionados por el mismo motor y con enfriamiento entre ellos.
7. *Curvas características.* Son gráficas de presión de descarga contra capacidad a la entrada.
8. *Curvas de rendimiento.* Muestran la potencia en la flecha contra capacidad a la entrada.
9. *Presión equivalente de aire.* Es un término muy usado en compresores centrífugos y axiales, para efectos de comparación. Es la presión manométrica en lb/plg² que un compresor con carga normal puede desarrollar cuando succiona aire a la presión absoluta de 14.4 lb/plg² y 60°F.

Al igual que las bombas centrífugas, los compresores o ventiladores centrífugos y axiales proporcionan el bombeo o acción compresora por la rotación de los álabes en el rodete. La carga de velocidad impartida al gas en el rodete es convertida a carga de presión en la voluta o en el difusor. A simple vista puede confundirse a un compresor centrífugo de pasos múltiples (Fig. 15-8) con una bomba centrífuga de pasos múltiples. Sin embargo, en los compresores el ancho de los rodetes se ve disminuido desde el lado de baja hasta el lado de alta presión debido a la disminución del volumen del fluido cuando el gas se comprime.

Algunos expertos creen que los compresores centrífugos están empezando un periodo de popularidad semejante al que tuvieron las bombas centrífugas en la década pasada. La máquina centrífuga tiene ventajas muy definidas sobre la máquina de pistón cuando se manejan volúmenes grandes de aire a bajas presiones (véase más

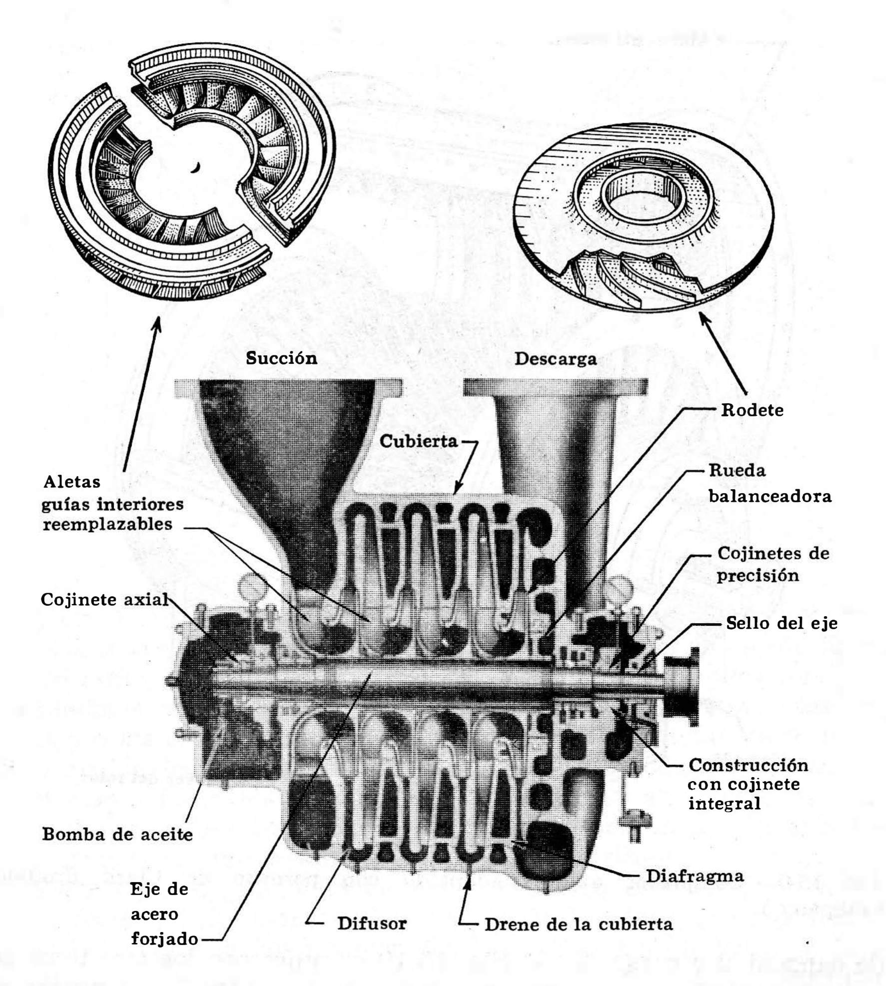


FIG. 15-8. Compresor centrífugo de pasos múltiples. (Cortesía de Clark Brothers Company. Dibujos superiores adaptados con permiso.)

adelante). A volúmenes pequeños, la eficiencia del compresor centrífugo baja tan rápidamente que su uso es incosteable. Sin embargo, la variedad de aplicaciones se está continuamente aumentando para los nuevos diseños y técnicas desarrolladas.

Tipos de rodetes

Antes de iniciar la discusión de los tipos de ventiladores centrífugos, sopladores y compresores, serán de mucha utilidad algunos comentarios respecto a rodetes. Al igual que para las bombas centrífugas, la forma del álabe tiene influencia en las características

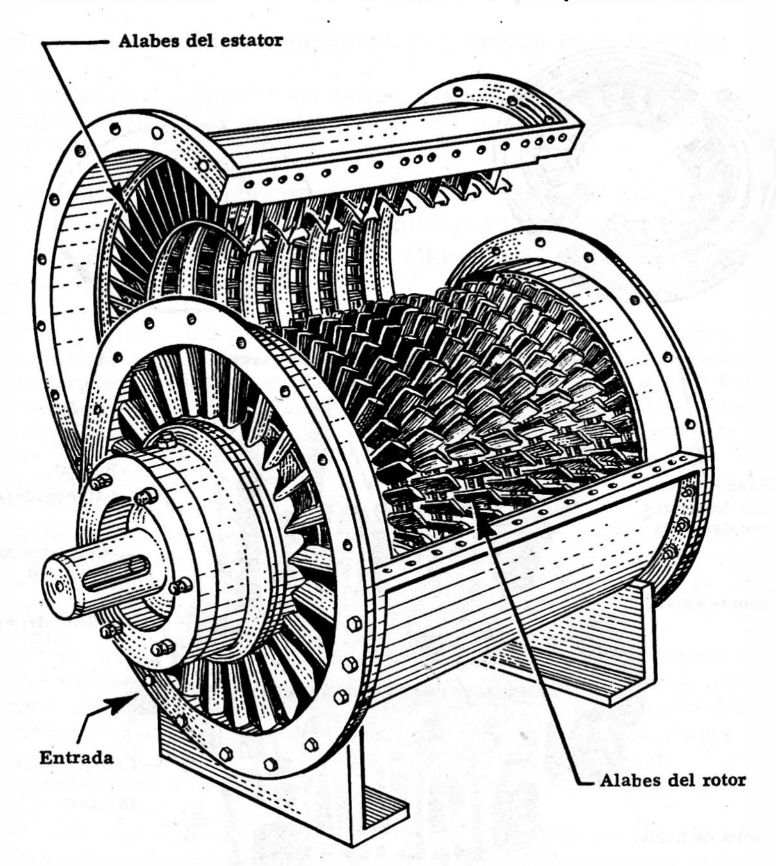


FIG. 15-9. Compresor axial. (Adaptado con permiso de Clark Brothers Company.)

de capacidad y carga. En la Fig. 15-10 se muestran los tres tipos de rodetes centrífugos más importantes: (*a*) curvados hacia adelante; (*b*) curvados hacia atrás; (*c*) radiales.*

Se muestran las curvas características típicas† para estas formas de rodetes. Puede observarse que la carga máxima ocurre en el punto *M*. Igual que para el caso de las bombas, el trabajar en o cerca de este punto crea una situación inestable ya que la máquina fluctúa entre dos capacidades para una misma presión de descarga. Para el rodete de álabes curvados hacia adelante, el punto crítico o máximo está más alejado del origen que para los demás rodetes y la eficiencia correspondiente está en la región inestable. Sin embargo,

* El término *radial* aquí empleado implica un arreglo radial de los álabes del rodete con respecto al eje de rotación. Estos pueden ser tipo paleta o pueden estar curvados en un extremo a la entrada. Debido a que todas las máquinas radiales imparten movimiento radial al flujo de gas, caso opuesto al de las máquinas axiales de flujo axial, el término radial se usa también para describir a los compresores y sopladores centrífugos.

† Estas curvas son representativas de tipo general. Se tienen algunas variaciones al haber alteraciones en la curvatura del álabe.

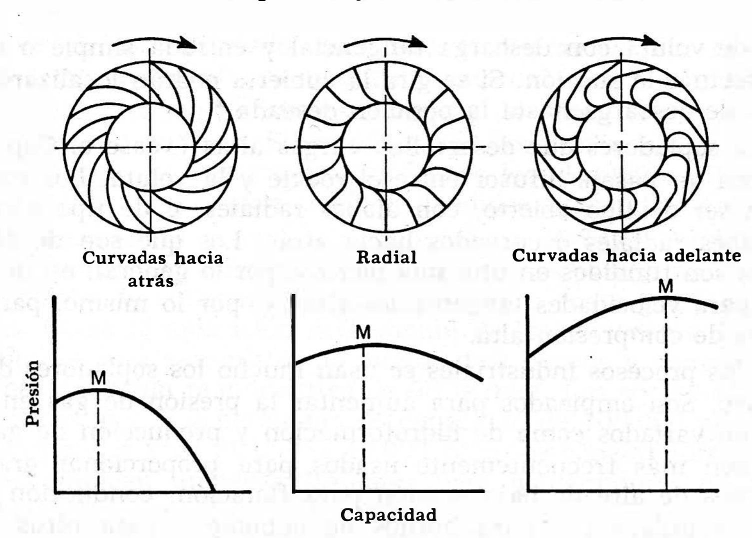


FIG. 15-10. Tipos de rodetes y características típicas.

para un determinado diámetro, el rodete con álabes hacia adelante maneja mayor volumen de gas que el que manejan los otros tipos. Por lo tanto, este tipo de rodete es el más usado en aplicaciones de ventiladores en los que se requieran capacidades altas y presiones bajas, en los casos de que pueda evitarse convenientemente trabajar en la región inestable. Para presiones altas y velocidades altas, los rodetes radiales y los de álabes curvados hacia atrás son los más eficientes y confiables; por lo tanto, para esta condición son los más usados en compresores y sopladores centrífugos.

Debe tenerse gran cuidado en el balanceo estático y dinámico de los rodetes de los compresores y sopladores, debido a que se tienen velocidades altas en los mismos. En la fábrica, las unidades se revisan a una velocidad 25% mayor que la nominal a efecto de verificar su balanceo; esto se hace antes de la entrega de las unidades.

Sopladores de un solo paso

Los sopladores de un solo paso, regularmente se fabrican de dos tipos; ambos tienen rodetes volados igual que las bombas centrífugas. El rodete puede quedar colocado en el mismo eje del motor o en eje separado soportado por dos chumaceras y conectado al motor mediante brida, al igual que para cada casi todas las bombas centrífugas. Estas unidades operan en forma muy económica para gastos de alrededor de 8 000 pies^3/min de aire estándar y presiones en la descarga de 2 a 9 lb/plg^2. Las cubiertas son de hierro fundido, pero también pueden hacerse de aleaciones especiales para servicio corrosivo o para presiones de entrada muy altas.* La cubierta tiene

* Las cubiertas para paso simple se han diseñado para operación de 900 lb/plg^2.

forma de voluta con descarga tangencial y entrada simple o doble para efectuar la succión. Si se gira la cubierta podrán localizarse las toberas de descarga hasta la posición deseada.†

Para sopladores que desarrollan cargas altas (véase el Cap. 14) se coloca un pasaje difusor entre el rodete y la voluta. Los rodetes pueden ser de tipo abierto, con álabes radiales, o de tipo cerrado, con álabes radiales o curvados hacia atrás. Los que son de álabes radiales son fundidos en una sola pieza y, por lo general, están diseñados para velocidades tangenciales altas y, por lo mismo, para relaciones de compresión alta.

En los procesos industriales se usan mucho los sopladores de un solo paso. Son empleados para aumentar la presión de gas en procesos tan variados como de hidroformación y producción de gas de agua. Son más frecuentemente usados para proporcionar grandes volúmenes de aire de baja presión para flotación, conducción neumática, ventilación y para hornos de cubilote y para otros tipos de hornos.

Compresores y sopladores de pasos múltiples

Se han diseñado unidades de pasos múltiples para obtener altas presiones de descarga (Fig. 15-8). En estas unidades se usan exclusivamente rodetes totalmente encerrados que están acuñados al eje. Los rodetes grandes tienen discos de aleación que están maquinados, y álabes con cubiertas de placa, los cuales generalmente son curvados hacia atrás; son de placa de acero inoxidable y se colocan soldados o remachados. El tener al rodete totalmente encerrado provee un mejor soporte a los álabes proporcionando en esta forma un diseño más apropiado.

Cada rodete está rodeado por un difusor sin álabes (Fig. 15-8) para convertir la carga de velocidad en carga de presión. A la entrada de cada rodete se tienen álabes guías que pueden hacerse ajustables de manera que se puedan cambiar las características del compresor cambiando el ángulo de los álabes.

Se llama diafragma a las paredes de separación que se tienen entre cada uno de los pasos (Fig. 15-8). Se construyen como pasadizos que conducen el gas del difusor del paso anterior hasta los álabes guía del siguiente paso. Los álabes guía pueden ser difundidos integralmente o bien estar sujetos al diafragma. Al tener relaciones de compresión alta en cada uno de los pasos, esto provocará temperaturas altas en los mismos. Los diseños de los diafragmas deben hacerse para tener enfriamiento interno del flujo de gases que pasa a través de los pasos; para ello se pasa una corriente de agua fría a

† El número de posiciones está limitado solamente por el número de agujeros que se tiene en la estructura.

través de un paso desviador que tiene el diafragma. Sin embargo, los compresores centrífugos americanos normalmente no se enfrían.

Las cubiertas son de hierro fundido o de acero, según sean las condiciones de operación. Están divididas horizontalmente para tener acceso fácil en caso de reparación. Todos los elementos fijos tales como los diafragmas están también divididos horizontalmente.

Los compresores y sopladores centrífugos de pasos múltiples se emplean bastante en muchas plantas de procesos para el movimiento y compresión de volúmenes grandes de aire o gas a presiones moderadas. Quizá la aplicación más común de los sopladores de pasos múltiples es para suministro de aire a altos hornos y convertidores Bessemer a presión manométrica de 30 lb/plg². Los sopladores para altos hornos, por lo general, son de capacidad de 100 000 pies³/min de aire estándar y de 30 000 a 40 000 para los convertidores Bessemer. Se emplean unidades similares para convertidores de cobre. Los sopladores centrífugos se emplean en algunos otros procesos industriales tales como (1) compresión de los gases de los hornos de secado de cal para 10 a 15 lb/plg² para tratamiento de salmuera; (2) suministro de aire de regeneración para procesos en las unidades de desintegración catalítica. (20 000 a 600 000 pies³/min a presión manométrica de 15 a 25 lb/plg²); (3) eliminación de gases en cualquier proceso que involucre recirculación; (4) aeramiento de aguas negras. Casi todas las aplicaciones con sopladores de pasos múltiples requieren de dos a cinco pasos.

A medida que se aumenta la diferencia de presiones, se emplea el término compresor centrífugo en lugar de soplador. Fue sorprendente la popularidad alcanzada por los compresores centrífugos hace algunos pocos años. Los diseños son tales que se tienen extensiones del eje hacia ambos lados, permitiendo acoplamiento hasta de tres compresores accionados por el mismo motor, con lo que se logran ahorros en espacio y en costo inicial. En la Fig. 15-11 se muestran estos arreglos. Esta unidad se diseñó para comprimir oxígeno con tres compresores en serie, comprimiendo desde 14.7 lb/plg² abs hasta 350 lb/plg² man con enfriamiento entre los compresores. Se fabrica en unidades para manejar desde 2 000 hasta 120 000 pies³/min.

Por su economía en manejar flujos muy grandes, se ha seleccionado al compresor centrífugo para los sistemas de refrigeración necesarios en las plantas de desparafinaje. Esta misma característica hace adecuado el uso de los compresores centrífugos como paso inicial en la compresión de grandes volúmenes de gas, tales como para la alimentación de gas a los convertidores de amoniaco o para plantas de gasolina natural. En estos casos, el compresor centrífugo comprime el gas hasta una presión manométrica de 40 a 150 lb/plg². Para manejo de volúmenes pequeños de gas a presiones altas, se utiliza primero compresor centrífugo y después compresor de pistón,

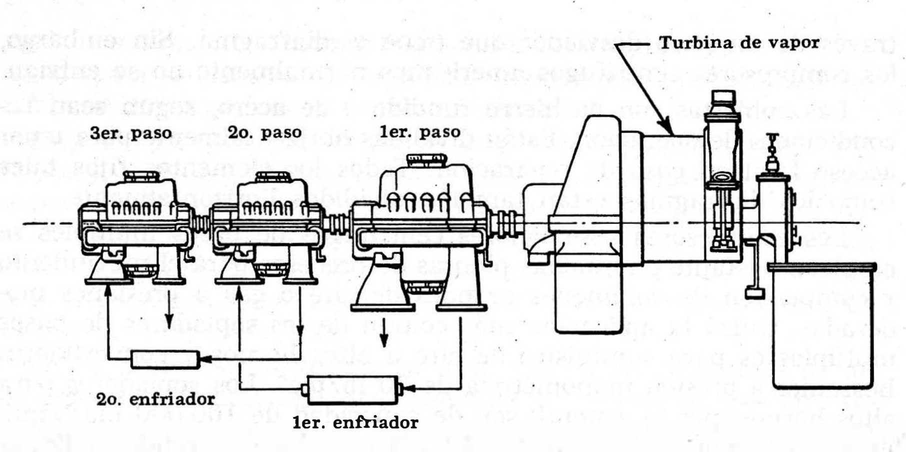


FIG. 15-11. Disposición de cilindros centrífugos en línea. (Adaptado con pemiso de Clark Brothers Company.)

lo que permite trabajar con compresor de pistón de menor tamaño. Otras aplicaciones típicas son producción de aire de presión de 100 lb/plg² usado en algunas plantas, unidad para compresión de gas o para recuperación de vapor; compresión de butano en unidades de alcalinización y para elevar la presión del flujo que se tenga en tuberías.

Algunas características de las máquinas centrífugas

Sellos del eje. En el caso de sopladores de aire de baja presión en los que no representa mucha desventaja el tener fugas pequeñas de aire, se utilizan sellos laberínticos alrededor del eje en el lugar donde éste entra en la cubierta. Estos sellos están constituidos por pequeñas tiras metálicas de acero inoxidable o de algún otro material apropiado, las cuales están diseñadas para tener un claro radial de un minuto entre el eje y la tira. Se tienen fugas muy pequeñas a través del sello. También se instalan laberintos alrededor de la entrada del rodete para prevenir fugas entre los pasos.

Para manejo de aire o gases de presión alta, el prensaestopas evita la fuga de gas entre el eje y la cubierta. Se fabrican prensaestopas de varios tipos. Con mucha frecuencia se usa un sello de agua patentado. Un collarín o camisa con un rodete pequeño, maquinado sobre el mismo, rota con el eje en una cámara llena de agua y crea un sello efectivo. Este sello no funciona cuando el soplador no está trabajando. Se previenen las fugas durante este periodo haciendo ajuste manual en el collarín. Otro sello muy popular que se usa con compresores de gas es un sello de aceite que trabaja sin tener contacto entre metal y metal. El sellado se logra mediante una película de aceite a presión. El aceite para sellar se suministra con una bomba accionada directamente por el eje del compresor o por un motor

separado. Este sello trabaja satisfactoriamente para presiones altas. También se usan sellos construidos de anillos de carbón que se mantienen unidos al eje mediante resortes. Estos trabajan satisfactoriamente para presiones manométricas hasta de 50 lb/plg². Se usan sellos mecánicos similares a los que se usan para bombas centrífugas para los casos en que no se tolera ninguna fuga. La principal desventaja de los sellos mecánicos es la gran pérdida de fricción debida al contacto directo en las superficies selladas.

Cojinetes. En el lado de la descarga se instala un tambor balanceador (Fig. 15-8) para soporte parcial de la carga axial. Sin embargo, se ilustra en el otro extremo un cojinete axial tipo Kingsbury para soporte de la carga axial generada. Los soportes principales del rotor, por lo general, están constituidos por chumaceras con revestimiento de metal babbitt. Se usan rodamientos o cojinetes de bolas en los sopladores de presiones bajas.

Lubricación. Los sopladores de baja presión están equipados con cojinetes de bolas, los que a veces requieren lubricación con grasa. Sin embargo, se necesita lubricación a presión para las chumaceras planas que tienen los compresores y sopladores. En algunos compresores de velocidad alta se tienen sistemas de lubricación muy elaborados que aseguran una lubricación satisfactoria. Se tiene una bomba de engranes sumergida en el depósito donde se encuentra colocada la chumacera, la que suministra aceite que pasa a través de un enfriador y de un filtro para finalmente llegar a lubricar las chumaceras, después de lo cual el aceite es regresado al depósito.

Compresores axiales

Se utilizan compresores axiales para el caso de manejo de volúmenes de aire superiores a 150 000 pies³/min de aire o gas estándar. En la Fig. 15-9 se muestra un compresor axial que consiste de álabes fijos a un tambor que se encuentra en rotación. La forma de los álabes es tal que producen movimiento axial al gas. Este movimiento es convertido a carga de presión a través de álabes fijos que están sujetos a la cubierta. Los álabes que se encuentran a la entrada tienen longitud mayor que los que están a la salida.

La eficiencia de estas máquinas es grande cuando se manejan volúmenes grandes de gas. Comparando la unidad centrífuga (radial) con la axial, ésta tiene una curva presión volumen de pendiente mayor y por lo mismo se le usa con mayor ventaja en aplicaciones que requieren de volumen constante. Estas máquinas son muy usadas en instalaciones que tienen turbinas de gas y en la aviación. Las industrias de procesos verán con mucho interés el desarrollo y las aplicaciones futuras que tengan estas unidades.

Equipo propulsor usado en compresores y sopladores centrífugos y axiales

Los motores eléctricos y las turbinas de vapor son las máquinas más comúnmente usadas para dar movimiento a los sopladores y compresores axiales. Las unidades de velocidad alta (4 000 a aproximadamente 10 000 rpm) requieren conexión directa a las turbinas de vapor, lo que en sí constituye una ventaja. En muchos casos de motores eléctricos se necesita aumentar la velocidad, mediante engranes, hasta la necesaria en la máquina centrífuga. Las máquinas axiales de capacidad alta pueden diseñarse para que trabajen a velocidades comparables a las de los motores.

Actualmente se utiliza también la turbina de gas para impulsar a los compresores centrífugos. Es de esperarse que en un futuro se tenga un mayor uso de los compresores centrífugos para competir con los compresores de pistón en aquellos lugares en que pueda adquirirse el gas a bajo precio. Se tienen varias instalaciones de turbinas de gas usadas con compresores centrífugos.*

Regulación de la velocidad en compresores y sopladores centrífugos y axiales

Si el compresor es accionado por una turbina, el método de control más satisfactorio consiste en variar la velocidad de la turbina. Para máquinas de velocidad constante, el método más adecuado es mediante estrangulamiento en la succión. En caso de tener constante la presión en la descarga y para una masa de flujo dada, se tendrá menor consumo de potencia haciendo el estrangulamiento en la succión que haciéndolo en la descarga. Esto lo ha analizado Kassarik[10] en sus estudios.

Un segundo método de regulación en máquinas de velocidad constante es mediante el uso de álabes ajustables colocados a la entrada del primer paso. Estos pueden cambiarse de posición accionando engranes y eslabones, de tal manera que en forma automática se pueden cambiar las características presión volumen del compresor al tenerse cambios en el ángulo de entrada. El método de álabes guía es más eficiente que el de estrangulamiento en la succión.

Debido a lo relativamente plano de la curva característica de las máquinas centrífugas resulta más adecuado usar el flujo como elemento sensible para actuar los controles de la máquina centrífuga. Este flujo, por lo general, se obtiene utilizando un medidor venturi.

Las máquinas centrífugas son idealmente apropiadas para usarse como unidades alimentadoras de compresores de pistón. En estos casos es necesario controlar la presión en la descarga de la centrífuga para asegurar una operación uniforme en el compresor del

* Una de las instalaciones más grandes emplea 10 turbinas de gas para compresores centrífugos usados para reinyectar gas natural a la presión manométrica de 1935 lb/plg². Se utiliza un arreglo de compresores en serie y en paralelo.

pistón. Esto se logra usando un regulador de presión en la línea de descarga del compresor centrífugo. En el diseño de los sistemas de control de estas instalaciones, es muy importante asegurarse que un control no efectúe trabajo en contra de otro.

Ventiladores

Se fabrican ventiladores centrífugos y de flujo axial. Los diseños axiales son las unidades llamadas tipo hélice. Se aplican los mismos principios discutidos anteriormente. Estos son muy usados en las plantas de proceso para ventilación, para conducción y eliminación de polvos, como ventiladores para proporcionar tiro a los hornos de calderas, para circulación de aire caliente o gases y para otras aplicaciones similares.

Compresores y sopladores rotatorios

Los gases se comprimen en los compresores y sopladores rotatorios por la acción positiva de los elementos que están en rotación. Se tienen varios diseños de estas máquinas de desplazamiento posi-

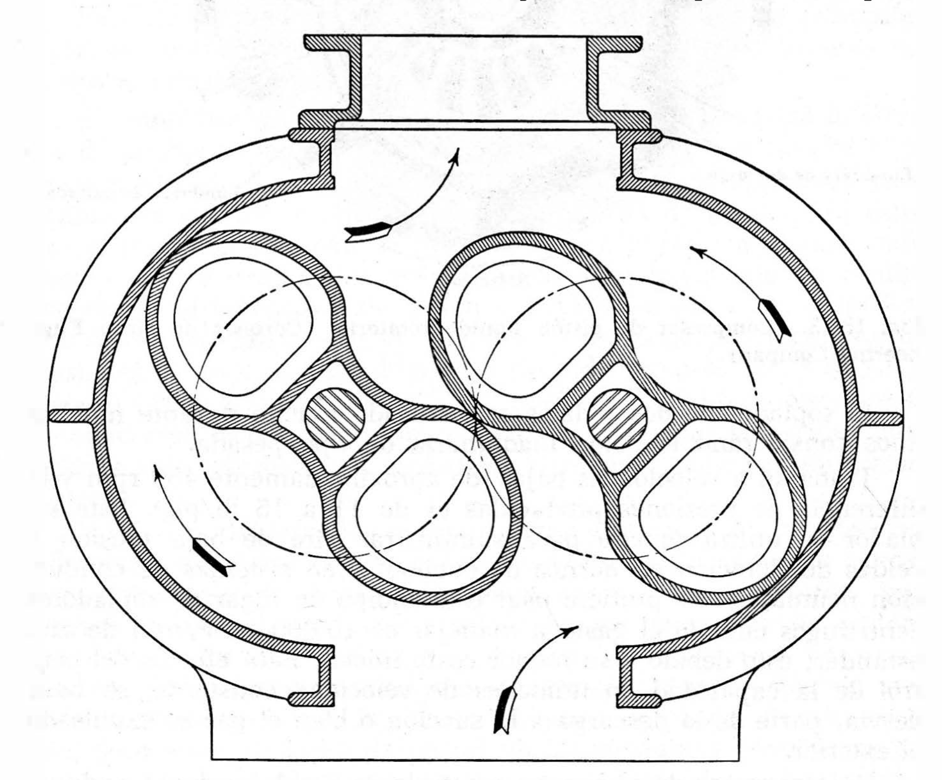


FIG. 15-12. Soplador de dos rodetes. (Cortesía de Roots-Connersville Blower Division of Dresser Industries.)

tivo las que son muy usadas. El tipo de álabe deslizante (similar a la bomba de álabes deslizantes de la Fig. 14-19) tiene un rotor montado excéntricamente al que se le ajustan los álabes deslizantes. Los sopladores de los rodetes tienen dos rodetes del lóbulo apareados, los que giran en direcciones opuestas (Fig. 15-12). Los rodetes no se tocan, por lo mismo no se necesita tener lubricación interna, lo cual es una ventaja cuando se comprime aire.

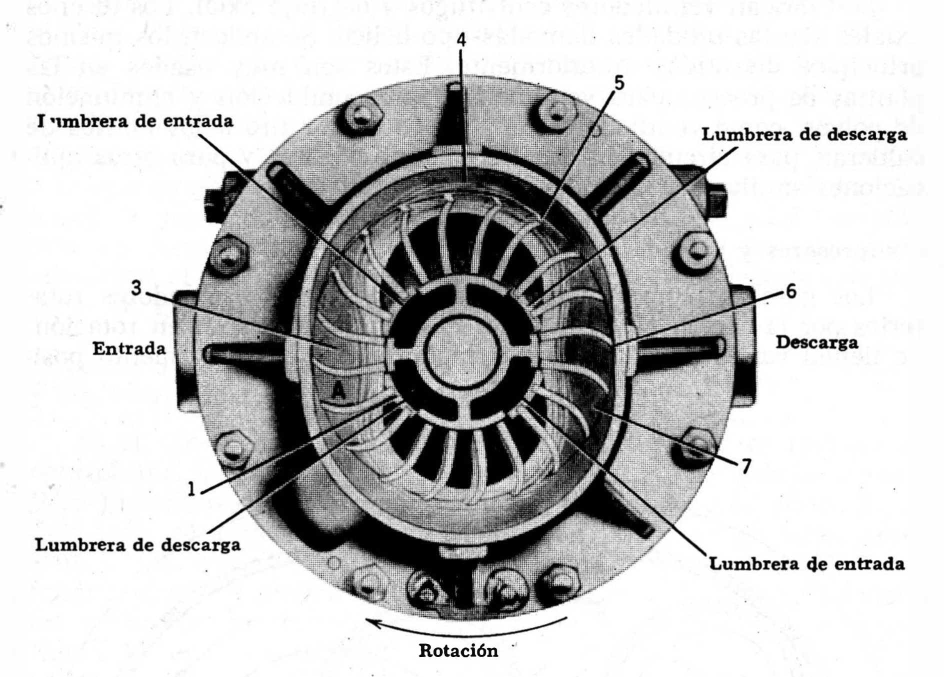


Fig. 15-13. Compresor de pistón líquido rotatorio. (Cortesía de Nash Engineering Company.)

El soplador de dos rodetes se ha usado mucho durante muchos años considerándolo como maquinaria de tipo pesada.

Trabajan a velocidades bajas, de aproximadamente 450 rpm y la diferencia de presiones producidas es de 11 a 15 lb/plg². Este soplador se utiliza mucho para suministrar aire de baja presión a celdas de flotación en hornos de cubilote y en sistemas de conducción neumática. Se prefiere usar este equipo en lugar de sopladores centrífugos cuando el gasto a manejar es 10 000 pies³/min de aire estándar; esto debido a su menor costo inicial. Para efectos del control de la capacidad en unidades de velocidad constante, se hace desviar parte de la descarga a la succión o bien el gas es expulsado al exterior.

Un tercer tipo de compresor rotatorio de desplazamiento positivo, es el tipo de pistón líquido rotatorio mostrado en la Fig. 15-13. El

rotor de álabes múltiples de esta máquina gira en una cubierta elíptica parcialmente llena de agua o de algún otro líquido. El rotor gira a velocidad suficiente para lanzar al líquido contra las paredes de la cubierta. La forma elíptica de la cubierta favorece el que se llenen con líquido los álabes del rotor que se encuentran a uno de los lados, descargándose los mismos al llegar a las partes superior e inferior. Este movimiento atrae al gas hacia las lumbreras de entrada, lo comprime y lo descarga por las lumbreras de salida. Se pueden tener presiones de valor hasta 75 lb/plg^2 y capacidades hasta 50 pies^3/min. Con estas unidades se pueden manejar algunos gases raros ya que el líquido a utilizar puede escogerse de acuerdo a la situación que en particular se tenga. Por ejemplo, se puede comprimir cloro seco, sin que se tenga contaminación con la humedad, si se usa ácido sulfúrico concentrado como agente líquido.

SELECCION DEL TIPO DE COMPRESOR PARA UN TRABAJO ESPECIFICO

Es difícil e inadecuado generalizar acerca del uso de diferentes tipos de equipo para una aplicación específica. Deben hacerse estudios económicos para cada caso.

El compresor de pistón es el más indicado a usarse para diferencia de presiones altas y para manejar volúmenes desde valor bajo hasta moderado. La máquina centrífuga resulta más apropiada para volúmenes grandes y una moderada diferencia de presión. El compresor rotatorio, tal como el tipo del lóbulo, puede ser el más indicado a usarse cuando las presiones sean tan bajas que no resulte económico el compresor de pistón o para volúmenes tan pequeños que no sea adecuado usar el compresor centrífugo. Se tienen varios traslapes de usos para los diferentes tipos de compresores. Karassik[10] elaboró varias gráficas (Fig. 15-14) mostrando los diferentes campos de aplicación de los compresores. Esto es solamente para fines ilustrativos y la selección del soplador o ventilador debe ser muy bien pensada.

No deben olvidarse los costos de mantenimiento en la selección del compresor. Por ejemplo, es bien sabido que las máquinas centrífugas requieren de menos mantenimiento que las de pistón. Las fuerzas de desbalance características de las máquinas de pistón, causan grandes deformaciones y desgaste de las piezas en movimiento. Sin embargo, resulta más complicada la reparación de una máquina centrífuga que la de una máquina de pistón. Resulta muy ventajoso tener repuesto de piezas de las máquinas centrífugas en el almacén de la planta, sobre todo si se trata de servicios muy importantes.

Campo del compresor de pistón

Basado en 14.7 lb/plg² abs y 60°F a la entrada

Campo del compresor centrífugo y axial

Campo del compresor rotativo de álabe

Campo del compresor rotativo de lóbulo

Campo del ventilador axial

Presión manométrica de descarga lb/plg²

Capacidad, pies cúbicos por minuto

Campo del compresor de pistón

Campo del compresor centrífugo y de tipo axial

Campo del compresor rotativo

Campo del ventilador axial

Carga adiabática, H_a, pies

Capacidad, pies cúbicos por minuto

Fig. 15-14. Gráficas para selección del tipo de compresor. [Reimpresa con permiso de I. J. Karassik, *Chem. Eng.*, 54, Núm. 10 (1947), y Worthington Pump and Machine Corporation.]

BOMBAS DE VACIO

Casi todo el equipo descrito hasta ahora puede construirse para usarse como bombas de vacío. Los principios de operación son los mismos, excepto que la presión de entrada es menor que la presión atmosférica, lo que requiere hacer ciertos cambios en el diseño. Por ejemplo, el manejo de volúmenes grandes a presiones bajas implica que el compresor tenga cilindros de mayor tamaño. Para la producción de vacío, especialmente en las unidades para destilación, es muy común usar eyectores de vapor con condensadores de contacto directo, conjuntamente con condensadores barométricos. En la Fig. 15-15 se ilustran varios tipos de equipo usados para producir vacío.

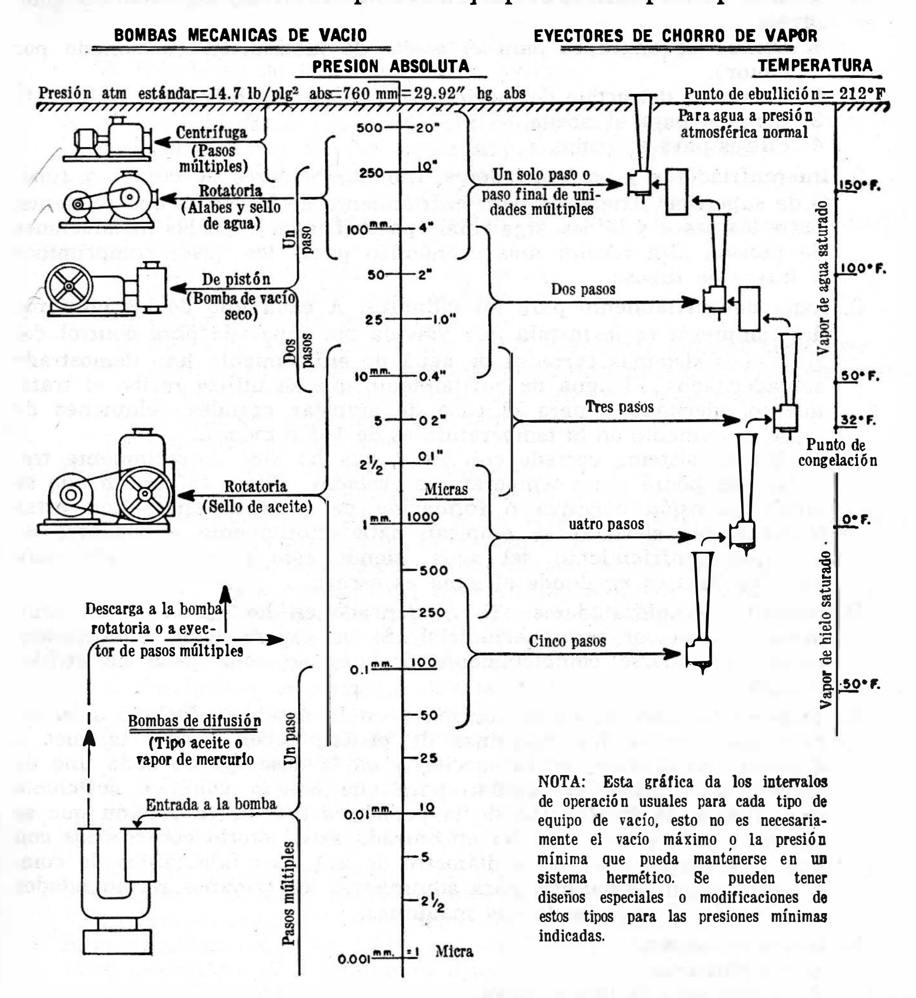


FIG. 15-15. Gráfica para selección del equipo de vacío. (Cortesía de Ingersoll-Rand Company.)

ACCESORIOS DE COMPRESORES

Los compresores de pistón de un solo paso y capacidad baja y los sopladores centrífugos requieren de muy pocos accesorios. Estos pueden ser cilindros enfriados con aire, lubricados con aceite. En cambio los compresores grandes que son típicos en plantas químicas y de petróleo, necesitan de una gran cantidad de accesorios. Algunos de los más importantes son:

I. Compresores de pistón.

A. Lubricación auxiliar y sistema de enfriamiento del aceite. Estos proporcionan lubricación forzada y enfriamiento del aceite del pistón, además de los lubricadores impulsados a través del cigüeñal del compresor.

1. Bomba de engranes para el aceite de lubricación (accionado por motor).
2. Enfriador del aceite de lubricación (cubierta y tubos).
3. Cedazos para el aceite.
4. Filtros para el aceite.

B. Interenfriadores y postenfriadores. Intercambiadores de coraza y tubo, o de superficie extendida para enfriamiento de los gases que se tienen entre los pasos y la descarga final (postenfriador). En las instalaciones de presión alta resulta más económico pasar los gases comprimidos a través de tubos.

C. Agua de enfriamiento para los cilindros. A cada uno de los cilindros del compresor se le instala una válvula por separado para control del flujo. Los sistemas cerrados de agua de enfriamiento han demostrado ser adecuados. El agua de enfriamiento que se utiliza recibe el tratamiento adecuado y para el caso de emplear grandes volúmenes de agua, el aumento en la temperatura es de 10° o menos.

En un sistema cerrado con agua, que ha sido correctamente tratada, ésta podrá tener temperaturas elevadas, 130 a 150°F sin que se tenga corrosión excesiva o formación de incrustaciones. Con estas temperaturas elevadas se emplean satisfactoriamente enfriadores de aire para enfriamiento del agua, siendo esto muy adecuado para aquellos lugares en donde el agua es escasa.

D. Depósitos deshidratadores. El condensado en los cilindros del compresor puede ser muy perjudicial. Si se espera tener condensado, deberá eliminarse completamente después de cada paso de enfriamiento.

E. Tanques igualadores en la succión y en la descarga. Debido a la acción pulsante de las máquinas de pistón, deben usarse tanques o depósitos igualadores en la succión y en la descarga de cada uno de los cilindros. Estos se diseñan para que tengan volumen suficiente para limitar la fluctuación de la presión a 5% de la presión que se tenga en el depósito y se ha encontrado satisfactorio construirlos con una relación de longitud a diámetro de 2:1. Los fabricantes de compresores están preparados para suministrar los tamaños recomendados de acuerdo al tamaño de sus máquinas.

F. Instrumentación.

1. Manómetros.
2. Indicadores de temperatura.
3. Registradores de presión y reguladores para accionar al regulador que modifica el espacio muerto de la presión succión.

4. Válvula reguladora de la presión de succión.
5. Válvula de alivio.

II. Compresores centrífugos.
A. Sistema auxiliar de lubricación.
1. Bomba. Muchas instalaciones están equipadas con bomba de engranes, la que está sumergida en el depósito abajo de la chumacera que está en la succión. Muchos operadores prefieren se tenga una bomba auxiliar.
2. Enfriador de aceite.
3. Filtro.
B. Sello de la bomba de aceite.
C. Interenfriador y separador de pasos intermedios. Son usados entre dos compresores colocados en serie.
D. Instrumentación.
1. Manómetros e indicadores de temperatura.
2. Reguladores de flujo (venturi) en la succión para control de la velocidad de la máquina propulsora o de la presión de succión.
3. Regulador de la presión de la succión.

III. Máquinas propulsoras.
A. Motores de gas o gas-diesel para compresores de pistón.
1. Compresores de aire de arranque (250 lb/plg² man).
2. Tanques igualadores.
3. Depósitos para el aceite diesel, bombas y filtros.
4. Bomba de engranes del aceite de la máquina, enfriador, filtros, cedazos.
5. Válvula reguladora del flujo de gas.
6. Tanque igualador para el flujo de gas.
7. Compresor para barrido del aire.
8. Filtro de aire para el aire de la máquina. Pueden ser torres de enfriamiento individuales las que enfrían el agua de la máquina al mismo tiempo que calientan el aire de la combustión.
9. Bomba del agua de enfriamiento.
10. Controles automáticos.
B. Turbinas y compresores centrífugos.
1. Regulador tipo Askania para control de la velocidad.
2. Condensador de superficie y eyectores de chorro de vapor y bombas de condensado para el condensador de la turbina.
3. Manómetros, termómetros y registradores del flujo de vapor.
C. Motores. Para compresores de gran tamaño, por lo general se usan motores sincrónicos, los que son muy caros y requieren de dispositivos de protección y de otros elementos que no son comunes en los motores pequeños. Algunos de éstos son:
1. Suministro de corriente directa de un motor generador o a partir de un rectificador de selenio para proporcionarle un campo al motor.
2. Sistema diferencial de protección contra cortocircuito.
3. Relevador instantáneo para protegerlo contra cortocircuito.
4. Relevador de inducción para protegerlo contra sobrecarga del rotor.
5. Relevador térmico para protegerlo contra sobrecarga.
6. Indicador de la temperatura del motor y alarma.

Algunos de estos accesorios son muy caros pero su uso se justifica en instalaciones donde se tienen motores de 1 000 hp o más.

El conocimiento de las características del suministro de energía y de la continuidad requerida en el proceso, le serán de mucha ayuda al ingeniero electricista para diseñar el sistema para que proporcione la máxima seguridad a la vida del motor. El ingeniero de proyecto deberá proporcionarle esta información, así como también indicarle el efecto producido en el proceso al ocurrir una corta interrupción en la energía eléctrica.

INSTALACION DEL COMPRESOR

La instalación de una máquina de baja velocidad puede ser muy simple, pero pueden tenerse complicaciones cuando se trata de unidades grandes. Para compresores de pistón, deben tomarse en cuenta las características de la fuerza de desbalance que producen, para el diseño del cimiento e instalación de las tuberías. En las máquinas centrífugas de velocidad alta deben tenerse alineaciones exactas para evitar peligro por vibraciones.

Los fabricantes de compresores proporcionan dibujos para la cimentación de sus unidades basándose en terreno firme. En caso de que el terreno no sea firme debe acudirse a un especialista en suelos para diseñar la cimentación adecuada. Para compresores de pistón es muy común utilizar relaciones de masas de 2:1 hasta 4:1 (peso de concreto a peso del compresor y motor). En compresores centrífugos de alta velocidad se tienen relaciones similares. Es preferible diseñar los cimientos de los compresores independientes de los cimientos del edificio. La separación y el aislamiento de los cimientos de la superficie del piso que rodea al compresor ayudan a eliminar vibraciones en el edificio.* Al tenerse varios compresores de pistón localizados en el mismo edificio, es deseable tener una losa de cimiento común para todos ellos.

La caseta que albergue a los compresores deberá estar bien ventilada a fin de eliminar las mezclas peligrosas de gases. Debe atenderse a las recomendaciones del fabricante a fin de dejar los espacios adecuados para servicio. Deben instalarse vigas cargadoras para colocación de grúas o montacargas a la altura conveniente y de suficiente capacidad para levantar las partes del compresor.

Deben usarse tuberías de diámetro adecuado a fin de eliminar caídas de presión indebidas, especialmente en los cabezales de succión de los compresores de pistón. En la práctica de compresores se ha encontrado muy adecuado tener una velocidad de flujo de 30 a 35 pies/seg. Resulta contraproducente tener tuberías de diámetro menor que el adecuado.

Para eliminar las pérdidas por fricción, deben evitarse hasta donde sea posible los cambios de dirección de la tubería, y donde sea necesario utilizar codos de radio grande. El tubo de llegada a un compresor centrífugo debe tener tramo recto mínimo de dos veces el diámetro del tubo. Esto es absolutamente necesario para compresores centrífugos. También debe evitarse tener vueltas agudas a la entrada de los compresores del pistón. El tubo de descarga en los compresores centrífugos debe ser de vuelta muy grande, alrededor de diez grados.

---

* En caso de compresores centrífugos también debe prevenirse la transmisión de vibraciones exteriores al compresor.

En las unidades de pistón no es recomendable instalar tuberías por encima del cabezal; esto debido a los problemas que se tendrían por el anclaje de las mismas debido a las fuerzas de desbalance que se tienen. El soporte y anclaje de las tuberías de descarga constituyen un problema que merece se le ponga la debida atención. Las vibraciones en sistemas mal anclados pueden causar fatiga y estallamiento de la tubería debido a la fatiga. Las tuberías para los compresores centrífugos deben ser adecuadamente soportadas y ancladas para evitar tener deformaciones en la cubierta del compresor.

Todas las tuberías del compresor deben limpiarse interiormente a fin de extraerle las incrustaciones y materia extraña que alojen. Particularmente durante el periodo inicial de operación deben instalarse cedazos en las tuberías de succión.

TEORIA DE LA COMPRESION

Al ingeniero que ocasionalmente considera los cálculos de las características de un compresor deben parecerle desconcertantes las fórmulas y nomenclatura utilizadas. Sin embargo, al entenderse los diferentes principios básicos de la termodinámica se comprenderá que todas las ecuaciones usadas para el diseño del compresor están basadas en dichos principios.

Funciones termodinámicas de la energía y trabajo de compresión

Aun cuando los compresores de pistón combinan en su funcionamiento un proceso de flujo y no flujo, el resultado final es un proceso de flujo. Por lo tanto, las ecuaciones para todos los tipos de compresores pueden basarse en la ecuación del trabajo obtenida a partir del balance general de energía. Es muy conveniente basar todos los cálculos en el proceso ideal reversible. De esta forma pueden hacerse cálculos rigurosos con relativa facilidad, pudiendo después hacer correcciones en forma de eficiencias para referirse al caso real.

El balance total de energía

El balance total de energía, en forma diferencial y suponiendo los efectos potenciales, de superficie y eléctricos, puede expresarse como sigue:

$$d(PV) + d\left(\frac{mu^2}{2g_c}\right) + dU = dq - dW \quad (1)$$

donde P = presión, #/pie²
V = volumen, pies cúbicos
m = masa, lb

g_c = factor de valor 32.17 para conversión de unidades absolutas a unidades de ingeniería
U = energía interna, pies-#
q = calor agregado de los alrededores,* pies-#
W = trabajo hecho sobre los alrededores (trabajo de expansión), pies-#
= libras de fuerza

Ahora la diferencial exacta de la función de la energía U (energía interna) es $dU = T\,dS - P\,dV$ y para un proceso reversible $dq = T\,dS$ (donde S es la entropía y T la temperatura absoluta). Entonces, con las restricciones de un proceso reversible (operación ideal sin fricción) la Ec. 1 queda:

$$V\,dP + P\,dV + \frac{m(u_2^2 - u_1^2)}{2g_c} + T\,dS - P\,dV = T\,dS - dW$$

o

$$-dW = V\,dP + \frac{m(u_2^2 - u_1^2)}{2g_c}$$

o

$$-W = \int_1^2 V\,dP + \frac{m(u_2^2 - u_1^2)}{2g_c} \qquad (2)$$

Los índices uno y dos se refieren a los estados inicial y final.

Trabajo teórico de la compresión

Para el caso usual de compresión donde se desprecian los efectos de la energía cinética, la Ec. 2 queda:

$$-W = \int_1^2 V\,dP \qquad (3)$$

Para ventiladores y otros sopladores de presión diferencial V puede considerarse constante y el trabajo será igual a: $V(P_2 - P_1)$. Las Ecs. 2 y 3 son válidas únicamente para procesos de flujo reversibles. Irreversibilidadcs tales como los efectos de fricción incrementan el trabajo total que deba hacerse. Algunas autoridades[9] llaman al término $\int_1^1 V\,dP$ *trabajo útil en la flecha.*

Es posible desarrollar la Ec. 3 para trabajo de flujo reversible al considerar el área del diagrama ideal *PV*. Este método es tal vez más conciso, pero se tienen limitaciones cuando no se usa directamente el balance general de la energía en el desarrollo.

La Ec. 3 puede relacionarse directamente con las funciones termodinámicas de la energía al restringir ciertas diferenciales exactas de estas funciones a temperatura constante (isotérmicas) y entropía constante (adiabáticas). Estas diferenciales exactas cuyo desarrollo

* Esta convención es consistente con casi todos los trabajos de termodinámica.

puede encontrarse en cualquier libro estándar de termodinámica en ingeniería química son:

$$dG = -S\,dT + V\,dP$$

$$dH = T\,dS + V\,dP$$

donde V = volumen
P = presión
T = temperatura absoluta
S = entropía
G = energía libre
H = entalpía

Compresión isotérmica reversible

Aplicando $$dG = -S\,dT + V\,dP$$

$$-S\,dT = 0 \text{ para } T \text{ constante}$$

$$\therefore V\,dP = dG$$

o $$-W = \int_1^2 V\,dP = \Delta G = \Delta H - T\,\Delta S \tag{4}$$

Compresión isoentrópica reversible*

Aplicando $$dH = T\,dS + V\,dP$$

$$T\,dS = 0 \text{ para } S \text{ constante}$$

$$\therefore V\,dP = dH$$

o $$-W = \int_1^2 V\,dP = \Delta H \tag{5}$$

Las Ecs. 4 y 5 indican dos métodos diferentes para determinar el trabajo reversible de compresión. Primero, si se conoce la relación entre P y V para los procesos isotérmicos e isoentrópico, el trabajo se obtiene al efectuar la integración del término $\int_1^2 V\,dP$. Segundo, si se conocen los valores de la entalpía y la entropía a las condiciones inicial y final, el trabajo puede calcularse como $\Delta H - T\Delta S$ para trabajo isotérmico y ΔH para isoentrópico. Se ha establecido como base estándar de comparación, el trabajo isoentrópico reversible por lo fácil que resulta calcularlo a partir del diagrama de Mollier. Si se conoce la temperatura y presión iniciales y la presión en la salida, lo único que tiene que hacerse es trazar en el diagrama una línea

* Un proceso isoentrópico es un proceso adiabático ya que $dq = T\,dS$ para un proceso reversible. Por lo tanto, es común, a veces, llamar a la compresión isoentrópica por compresión adiabática. Tal práctica no es recomendable ya que todos los procesos adiabáticos no son necesariamente isoentrópicos o reversibles.

de entropía constante hasta la presión de salida para obtener la entalpía y temperatura finales. La entalpía final menos la inicial son los Btu de trabajo equivalentes y se convierten a pies-lb multiplicándolos por 778 (1 Btu = 778 pies-lb). Hougen y Watson[9] desarrollaron gráficas que permiten calcular las entalpías y las entropías cuando no se tienen los diagramas de Mollier o las tablas de entalpía.

Como más abajo se indica, la integración $\int_1^2 V\,dP$ se simplifica si el gas obedece a la ley de los gases perfectos. Sin embargo, es preferible usar el diagrama de Mollier cuando esto sea posible ya que no es necesario suponer que se trata de gas ideal y los resultados que se obtienen son para el gas real.

Ecuaciones basadas en la Ley de los Gases Perfectos:

La Ley de los Gases Perfectos se expresa como

$$PV = nRT \tag{6}$$

donde P = presión #/plg²
n = número de lb-moles
V = volumen, pies cúbicos
R^* = constante de la Ley de los Gases que en unidades consistentes vale 1 544 (#pie²)(pie³)/(lb-mol)(°R)

La Ec. 6 puede ser escrita en la forma:

$$P\frac{V}{n} = RT = Pv \tag{7}$$

donde v = volumen molal, pies³/lb-mol.

COMPRESIÓN ISOTÉRMICA REVERSIBLE (GAS IDEAL)

Empleando la Ec. 7, $v = RT/P$ el trabajo por mol ($-W_m$) es:

$$-W_m = \int_1^2 v\,dP = RT\ln\frac{P_2}{P_1} = 1544T\ln\frac{P_2}{P_1} \tag{8}$$

COMPRESIÓN ISOENTRÓPICA REVERSIBLE (GAS IDEAL)

Similarmente para el caso isoentrópico:

$$-W_m = \int_1^2 v\,dp = \int_1^2 RT\frac{dP}{P} = (\Delta H')(778) = 778C_p\,dT \tag{9}$$

donde $\Delta H'$ = cambio de entalpía para un gas ideal, Btu/lb-mol
C_p = capacidad molal de calor a presión constante, Btu/(lb-mol)(°F)

* Puede ser preferible recordar una constante del gas y hacer después las conversiones necesarias. Se tendrán menos oportunidades de error si las unidades se conservan en pies, libras y grados Rankine.

o
$$\left(\frac{R}{778}\right)\left(\frac{dP}{P}\right) = \frac{C_p\, dT}{T}$$

$$\frac{R}{778} = 1.987 \text{ Btu/(lb-mol)(° } R)$$

Designando por R' la constante de la ley de los gases.

$$\therefore R'\, d \ln P = C_p\, d \ln T$$

o
$$R' \ln \frac{P_2}{P_1} = C_{p_m} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

donde C_{pm} = media aritmética de la capacidad de calor de entrada y salida.

Entonces
$$T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{R'/C_{p_m}}$$

Ahora para un gas ideal $C_{v_m} + R' = C_{p_m}$ y designando $C_{p_m}/C_{v_m} = k$ (relación de capacidad de calor a presión constante C_{p_m} a la de volumen constante C_{v_m}), se obtiene la siguiente relación:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{C_{p_m} - C_{v_m}/C_{p_m}} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \tag{10}$$

La Ec. 10 proporciona un medio rápido para calcular la temperatura teórica al final de la compresión de un gas ideal si se conoce la temperatura inicial, la relación de compresión y la capacidad de calor.

De la Ec. 9 anterior:

$$-W_m = \int_1^2 C_p\, dT = C_{p_m}(T_2 - T_1)$$

Sustituyendo en la Ec. 10,

$$-W_m = C_{p_m} T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right] \text{ en Btu/lb-mol}$$

es muy conveniente convertir C_{p_m} a una expresión en términos de k

$$C_{p_m} = \frac{C_{p_m} R'}{R'} \qquad \text{además} \qquad R' = C_{p_m} - C_{v_m}$$

Entonces
$$C_{p_m} = \frac{C_{p_m} R'}{C_{p_m} - C_{v_m}} = \frac{\left(\frac{C_{p_m}}{C_{v_m}}\right)(R')}{\left(\frac{C_{p_m}}{C_{v_m}} - 1\right)} = \frac{k}{k-1} R'$$

Por lo tanto
$$-W_m = \frac{k}{k-1} R' T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right] \text{ Btu/lb-mol} \tag{11}$$

o
$$-W_m = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \text{pie-\#/lb-mol} \qquad (11a)$$

o ya que $P_1 v_1 = RT_1$

$$-W_m = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \text{pie-\#/lb-mol} \qquad (12)$$

De acuerdo a las suposiciones hechas en las derivaciones anteriores, los valores de k deben basarse en los valores promedio de k a la entrada y a la salida. Estas ecuaciones son verdaderas para un gas ideal y k debe obtenerse a partir de las capacidades de calor a 0 lb/plg² absolutas y de la temperatura promedio entre la entrada y la descarga. Inicialmente no se conoce la temperatura en la descarga, pero se puede suponer de un cierto valor. Para muchos problemas de compresores, la variación del valor del calor específico es muy pequeña, pudiendo considerarse satisfactorio suponerlo a la temperatura ambiente.

Las Ecs. 8, 11 y 12 tienen unidades de trabajo por mol (pies-lb por lb-mol). Se tienen muchas variaciones en estas ecuaciones, pero son todas básicamente las mismas, aunque a veces causa confusión la multiplicidad de fórmulas de compresores que se tienen en la literatura. Sin embargo, es deseable entender el desarrollo de una de las formas de ecuación, tal como las que se analizaron anteriormente, para después, si se cree conveniente, hacer la conversión a las unidades deseadas. Por ejemplo, para obtener el trabajo total por unidad de tiempo, será necesario únicamente multiplicar las ecuaciones por las lb-moles/min de alimentación al compresor. El trabajo por unidad de peso* (pies-lb de fuerza por lb de masa) puede obtenerse dividiendo la Ec. 12 por el peso molecular del gas. La potencia en caballos requerida para efectuar la compresión puede calcularse dividiendo el valor de los pies-lb por minuto obtenidos de una de las ecuaciones anteriores por 33 000 pies-lb por minuto por caballo.

Debido a que las ecuaciones están desarrolladas en base molal, deberá emplearse la capacidad de calor molal.

k puede calcularse como $C_{p_m}/(C_{p_m} - R')$.

Coeficiente politrópico de compresión

Ya que la compresión real no es ni isoentrópica ni isotérmica, debido a ciertos efectos internos de irreversibilidad, resulta preferible calcular el trabajo de compresión basado en la expresión PV^n = constante, donde n es definida como una constante politrópica. Para un gas determinado el valor de n puede determinarse a partir de las

* Al igual que para el caso de bombas, el trabajo por unidad de peso (pies-#/lb) es a menudo referido como *carga*, particularmente en el lenguaje de compresores centrífugos. Debe recordarse que el término pies de carga es realmente pies-lb de fuerza/lb.

pruebas características efectuadas en el compresor usando un diagrama indicador de presión contra volumen.

$$\text{Log } P + n \log V = \log \text{constante}$$

Por tanto, la pendiente de la línea del diagrama indicador dará un valor de n. Sin embargo, estos valores son aproximados.

La expresión del trabajo politrópico es

$$-W_m = \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \tag{13}$$

La potencia determinada a partir de esta ecuación es una estimación de la potencia indicada.

Debido a que es muy fácil calcular la potencia isoentrópica a partir de los diagramas de entalpía, tiene mucho mérito efectuar todos los cálculos con base isoentrópica. De esta manera, el cálculo del trabajo de compresión se hace con bastante aproximación y la potencia al freno se obtiene aplicando un factor apropiado de eficiencia. Es, por lo tanto, preferible hacer todos los cálculos en base isoentrópica y usar eficiencias de acuerdo a bases teóricas isoentrópicas. Para máquinas de pistón, la compresión se aproxima al caso isoentrópico debido a la chaqueta de agua que se tiene en el cilindro. No sucede lo mismo para compresores centrífugos no enfriados, aunque para este caso también se recomienda la base isoentrópica (véase más adelante).

Eficiencias del compresor

Es deseable definir las diferentes eficiencias utilizadas en compresores.

Eficiencia volumétrica

Al igual que para bombas de pistón, el volumen real de gas succionado por el cilindro del compresor de pistón a las condiciones de entrada, es menor que el desplazamiento del cilindro. Se le llama eficiencia volumétrica a la relación entre el volumen real medido y las condiciones iniciales del desplazamiento.

La relación entre la eficiencia volumétrica y el espacio muerto o perjudicial (C) se expresa como una fracción del desplazamiento total (D) por carrera, la que es fácil de calcular. El espacio muerto del cilindro se llena con gas comprimido el cual se reexpande en la carrera de regreso. El gas que se recibe durante la carrera de succión ve disminuido su volumen por una cantidad que es igual al volumen de este gas reexpandido. Para los gases ideales, la relación entre los

volúmenes de los espacios muertos en la succión (V_{1_c}) y en la descarga (V_{2_c}) está dada por:

$$P_2 V_{2_c}^{\,k} = P_1 V_{1_c}^{\,k}$$

o

$$V_{1_c} = V_{2_c}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} = CD\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k}$$

$$\text{Eficiencia volumétrica como fracción} = E_v = \frac{\text{Volumen en la entrada}}{\text{Desplazamiento}}$$

Entonces

$$E_v = \frac{D + CD - CD\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k}}{D}$$

donde $D + CD$ = volumen comprimido medido a las condiciones de la entrada.

o

$$E_v = 1 - C\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} - 1\right]^* \quad (14)$$

Eficiencia de operación del compresor

La eficiencia del compresor se puede definir de diferentes maneras, dependiendo del tipo de base que se escoja. No tiene sentido definir la eficiencia si no se tiene una referencia en que basarse. El usar una eficiencia del compresor representa, para cualquier caso, un intento para tomar en cuenta las irreversibilidades internas y pérdidas mecánicas que ocurren en la compresión real. Para los compresores de pistón, estas pérdidas son debidas a la fricción en el fluido, incluyendo pérdidas a través de válvulas, y por la fricción mecánica que se tiene en las partes que están en movimiento, tales como el pistón y el vástago del pistón. Las pérdidas en los compresores centrífugos incluyen la fricción del fluido, las fugas que se tienen a lo largo del eje y entre los pasos, la fricción en el disco y las pérdidas mecánicas en cojinetes y empaques. A continuación se enumeran algunas de las eficiencias más frecuentemente empleadas.

Eficiencia isotérmica:

$$\frac{\text{Trabajo isotérmico reversible} \times 100}{\text{Trabajo real en el eje}} = E_I$$

* Casi todos los fabricantes de compresores aplican un factor empírico de corrección por las fugas que se tienen por las válvulas. Al valor E_v obtenido de la Ec. 14 se le resta el valor de 0.01 (P_2/P_1).

El trabajo real en el eje equivale a la potencia del freno.
Eficiencia isoentrópica:

$$\frac{\text{Trabajo isotérmico reversible} \times 100}{\text{Trabajo real en el eje}} = E_s$$

Eficiencia mecánica:

$$\frac{\text{Potencia indicada}}{\text{Trabajo real en el eje}} = \frac{\text{Potencia indicada} \times 100}{\text{Potencia al freno}} = E_m$$

Eficiencia politrópica:

$$\frac{\text{Trabajo politrópico} \times 100}{\text{Trabajo real en el eje}} = E_p$$

Cuando el exponente politrópico es obtenido a partir del diagrama indicador real, la eficiencia politrópica basada en este valor de n es aproximadamente igual a la eficiencia mecánica.

Eficiencia de los compresores centrífugos

Algunos fabricantes se refieren a la eficiencia politrópica de los compresores centrífugos como eficiencia hidráulica o de aumento de temperatura. El trabajo en los compresores centrífugos sin enfriamiento, se aproxima más a la compresión politrópica que a la isoentrópica. Por lo tanto, la eficiencia isoentrópica de una máquina dada varía marcadamente con el gas. Esto es cierto ya que todas las pérdidas (con excepción de las pérdidas mecánicas que son un porcentaje muy pequeño del total) de calor que se tienen en el gas que se está comprimiendo, producen desviaciones de la línea que representa la condición isoentrópica. Estas desviaciones requieren diferentes eficiencias isoentrópicas según el gas que se tenga en la máquina.

En la Fig. 15-16 se indica la gráfica de eficiencias politrópicas de compresores centrífugos contra volumen succionado. Esta curva es una estimación para cualquier gas. La eficiencia politrópica varía con el tipo de gas comprimido aunque no tanto como la isoentrópica. Por lo tanto, es posible seleccionar una eficiencia politrópica para una determinada máquina si se conoce su curva, la que será similar a la de la Fig. 15-16. Sin embargo, no debe pasarse por alto la ventaja que representa obtener el trabajo en base isoentrópica. La eficiencia politrópica puede convertirse en eficiencia isoentrópica para el gas que se está considerando, utilizando para ello la Fig. 15-17; esto hará posible utilizar los diagramas de Mollier o las tablas de entalpías.

Eficiencia de compresores de pistón

Debido a que para los compresores de pistón la compresión se aproxima a la adiabática, no se tendrán dudas en hacer los cálculos

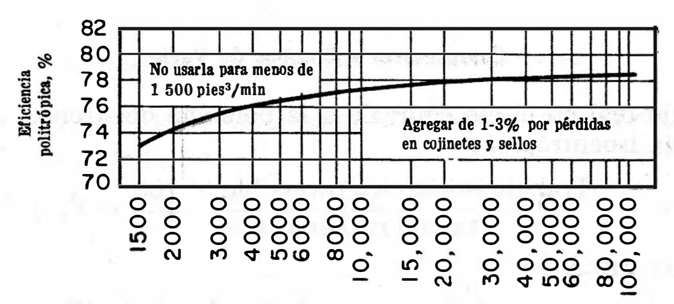


TABLA DE FACTORES DE CORRECCION DEBIDOS A RELACIONES DE COMPRESION

Relación de compresión	Volumen a la entrada en pies³/min 1500	2000	3000	4000	5000	7500	15,000	30,000	60,000 y más
1.35	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.75	.983	.990	.990	.994	.996	.996	.996	.996	1.0
2.25	.976	.977	.986	.985	.991	.995	.995	.995	1.0
2.80	—	.969	.980	.980	.989	.992	.993	.994	1.0
5.00	—	—	.965	.970	.972	.985	.991	.996	.997
10.00	—	—	—	.944*	.955*	.960*	.985*	.989*	.995
15.00	—	—	—	—	.935*	.957*	.971*	.986*	.993

NOTAS: Los asteriscos indican cifras que se aplican solamente a hidrocarburos de peso molecular alto. Los factores se aplican sólo a compresores de seis o menos rodetes.

FIG. 15-16. Volumen de la succión contra eficiencia politrópica. (Adaptada con permiso de Clark Brothers Company.)

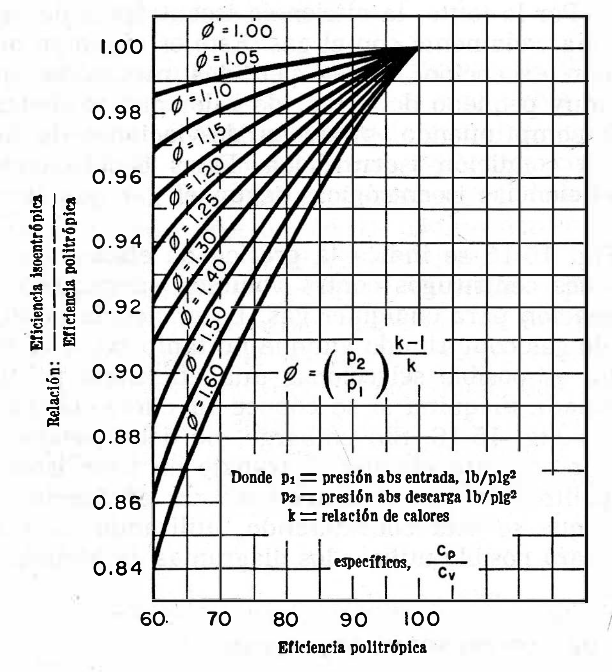


FIG. 15-17. Relación entre eficiencias isoentrópicas y politrópicas para compresores centrífugos. (Adaptada con permiso de Clark Brothers Company.)

en base isoentrópica y emplear eficiencias isoentrópicas para corregir el trabajo teórico y obtener el trabajo real. En la Tabla 15-1 se muestran algunas eficiencias típicas isoentrópicas para compresores de pistón, las que pueden considerarse como eficiencias mecánicas.

TABLA 15-1. EFICIENCIAS PARA COMPRESORES DE PISTON

$$\text{bhp} = \frac{\text{hp isoentrópico}}{\text{Eficiencia}}$$

Relación de compresión	Impulsada con motor de combustión*
1.1	50–60
1.2	60–70
1.3	65–80
1.5	70–85
2.0	75–88
2.5	80–89
3.0	82–90
4.0	85–90

* Multiplicar por 0.95 los valores anteriores para compresores impulsados por motor eléctrico.

Aumento de la temperatura con la compresión

Mediante la Ec. 10 podrá determinarse la temperatura final real del gas que se tiene en el compresor del pistón al final de la compresión; puede resultar más fácil usar el diagrama de Mollier ya que la compresión de la máquina se aproxima bastante a la isoentrópica. Sin embargo, para el compresor centrífugo sin enfriamiento, el aumento de temperaturas isoentrópicas no es comparable al aumento real ya que muchas de las pérdidas que se tienen sirven para calentar los gases que están siendo comprimidos. Se puede obtener una aproximación del aumento real de temperatura a partir de la siguiente relación:

$$\text{Eficiencia isoentrópica} = E_s = \frac{C_p\,\Delta T_S}{C_p\,\Delta T_a} \qquad (15)$$

o

$$\Delta t_a = \frac{\Delta T_S}{E_s}$$

donde ΔT_a = aumento real de la temperatura
ΔT_S = aumento isoentrópico de la temperatura

Curvas características de compresores centrífugos

Es costumbre de muchas personas que trabajan en la industria, pensar en términos de compresión del aire y en que muchas máquinas son probadas con aire. Sin embargo, el cliente puede pedir la

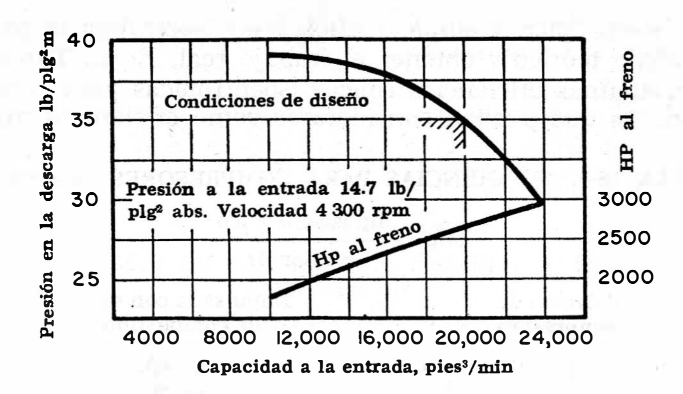


Fig. 15-18. Curvas características típicas de compresores centrífugos, volumen contra presión de descarga. (Adaptada con permiso de I. J. Karassik y Worthington Corporation.)

curva característica correspondiente al gas que va a comprimirse, basada en las condiciones iniciales de diseño.

Por lo general, en estas curvas el volumen se expresa en pies³/min a las condiciones de entrada contra la presión en la descarga expresada en lb/plg² absolutas. Se muestra, además, la potencia al freno. Estas curvas características (Fig. 15-18) se proporcionan para varias velocidades si la velocidad del motor es variable.

Otra curva muy útil que puede obtenerse a partir de la Fig. 15-18 es la de la carga isoentrópica y eficiencia la que puede ser independiente de la variación que se tenga a la entrada. Esto puede hacerse escogiendo varios puntos en la Fig. 15-18, calculando sus cargas isoentrópicas correspondientes y después la eficiencia isoentrópica (Fig. 15-19).

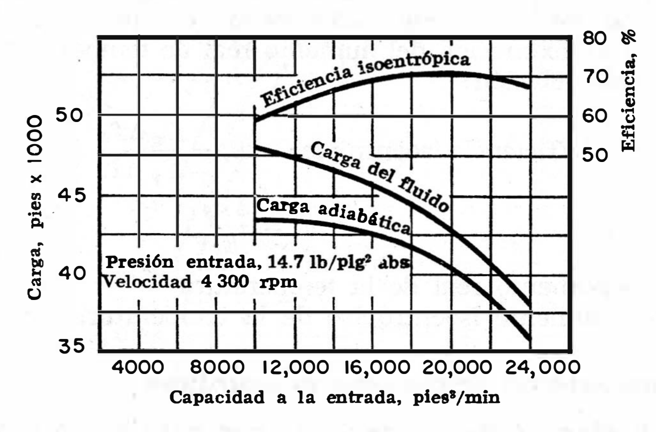


Fig. 15-19. Curva característica de un compresor centrífugo, volumen versus carga isoentrópica. (Adaptada con permiso de I. J. Karassik y Worthington Corporation.)

La Fig. 15-19 puede usarse para relacionar el volumen manejado contra la presión de descarga y curvas de bhp (potencia al freno) para cualquier presión de entrada. Si la presión en la entrada permanece constante y la temperatura de entrada es variable, la carga isoentrópica podrá permanecer constante si se tienen cambios en la relación de compresión (Ec. 11). Podrán trazarse para la nueva relación de compresión las curvas de presión de descarga contra cambios de la temperatura de entrada.

Puede aplicarse la misma relación desarrollada para bombas centrífugas la que expresa el efecto de los cambios de velocidad en las curvas características, aunque esto con menos exactitud para compresores centrífugos. Estas son aplicables a los mismos puntos de eficiencia:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \frac{H_{s_1}}{H_{s_2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \tag{16}$$

donde Q = volumen a la entrada
N = rpm
H_s = carga isoentrópica, pies-#/lb

Tamaño y velocidad de rodetes de los compresores centrífugos

El trabajo producido en el paso de un compresor centrífugo es una función de la energía cinética y puede expresarse en pies-# por lb en la forma siguiente:

$$W_I = K\frac{u^2}{g_c}$$

donde W_I = pies-#/lb
u = velocidad periférica, pies/seg
g_c = factor de conversión 32.2 (poundal por libra de fuerza)
K = coeficiente para todas las presiones, varía entre 0.5 y 0.65 dependiendo del diseño del rodete y del paso.

Una gran cantidad de máquinas centrífugas están diseñadas para velocidad periférica normal de 770 pies/seg. Por lo tanto, para un valor promedio de $K = 0.55$, el valor de 10 000 pies-lb de fuerza/lb por paso es un buen valor promedio para estimar el número necesario de pasos. Por lo tanto, el número de pasos depende de la relación de compresión y del trabajo por paso. La velocidad periférica se obtiene a partir del diámetro del rodete y de las rpm de la siguiente manera:

$$60\,u = \frac{\pi DN}{12}$$

o

$$u = \frac{\pi DN}{720}$$

donde D = diámetro, plg
N = rpm

Por lo tanto

$$N = \frac{u720}{\pi D} = \frac{720\sqrt{W_I g_c}}{\pi D\sqrt{K}} = \frac{1300}{D}\sqrt{\frac{W_I}{K}} \tag{17}$$

Puede, por lo tanto, escogerse un rodete de tamaño estándar y cálcular los rpm.

Compresión en pasos múltiples

La compresión de pasos múltiples que se discutirá en esta sección se refiere a compresión con interenfriadores completos entre los pasos. Esto se logra pasando los gases comprimidos a través de interenfriadores enfriados con agua, que están colocados entre los pasos de compresores de pistón o bien entre dos compresores centrífugos. De esta manera se pueden enfriar los gases hasta casi la temperatura de entrada después de cada paso de compresión, y el proceso de compresión se aproxima a la condición isotérmica, para lo cual el trabajo de la compresión es el mínimo. (Teóricamente la operación isotérmica para una relación de compresión conocida, requiere del trabajo mínimo; esto puede comprobarse comparando las Ecs. 8 y 11.)

El trabajo total de compresión en una operación de pasos múltiples es simplemente la suma de los trabajos en los varios pasos. Al suponer constantes k y la temperatura de succión en cada paso, podrá determinarse la relación de compresión óptima por paso haciendo igual a cero la derivada del trabajo total, con respecto a la presión intermedia, se obtiene la relación $(P \text{ salida}/P \text{ entrada})^{1/S}$, donde S es el número de pasos. Esta es la regla conocida de igual trabajo (igual relación de compresión) para cada paso. Estrictamente esta derivación sólo es verdadera para los gases ideales. Sobre la base de igual relación de compresión por paso, el trabajo total para S pasos será:

$$-W_m = S\left(\frac{k}{k-1}\right)(RT_1)\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/Sk} - 1\right] \tag{18}$$

Es preferible calcular los hp por separado para cada uno de los pasos, ya que deberá agregarse aproximadamente 5 lb/plg² a la presión de la descarga en cada uno de los pasos a fin de tomar en consideración las pérdidas por fricción que se tienen en la interconexión de tuberías y enfriadores intermedios. Por razones mecánicas es deseable tener aproximadamente el mismo trabajo en cada uno de los pasos. Para gases reales no necesariamente debe tenerse igual relación de compresión en cada paso.[6,14]

Dodge[4] reporta que la máxima relación de presión para cualquier paso de una máquina de pasos múltiples debe estar entre 3 y 5. Sin embargo, cada caso deberá ser considerado por separado y la relación de compresión más económica será determinada conjuntamente con el fabricante del compresor. Algunas relaciones típicas más usadas en compresión son las siguientes:

Compresores en tuberías de gran longitud	1.2 a 2.0
Compresores de procesos	1.5 a 4.0
Planta piloto pequeña para presión alta	6:1

La decisión final se basa en muchos factores. Desde luego que es deseable usar el número mínimo posible de pasos. Se tiene la limitación de la temperatura de los gases a la salida. La temperatura de los gases en la descarga debe conservarse menor a 300°F. Los fabricantes de compresores deben estimar la temperatura real en la descarga, ya que ésta depende del diseño del sistema de enfriamiento por agua que se tenga en el cilindro, aunque puede tenerse una idea aproximada de su valor basándose en los cálculos isoentrópicos (Ec. 10).

Cálculo para gases reales

Casi todas las ecuaciones anteriores se refieren a gases ideales para presiones altas. Algunos gases se desvían marcadamente del comportamiento del gas ideal. Se tiene un factor de corrección empírico llamado factor de compresibilidad el cual se multiplica a la expresión de la ley de los gases perfectos a fin de poderla aplicar a gases reales.*

$$Pv = zRT$$

Se ha encontrado que los factores de compresibilidad de todos los gases (Fig. 15-20) tienen correlación dentro de la exactitud de la ingeniería con las relaciones temperatura reducida, T/Tc y presión reducida P/Pc, donde T y P son temperatura absoluta y presión y Tc y Pc son temperatura absoluta y presión crítica del gas considerado. Para mezclas, resulta satisfactorio, para el cálculo de la temperatura y la presión reducida, emplear tempertaturas y presiones pseudocríticas. Estas se determinan del promedio molal de las temperaturas y presiones críticas de los componentes.

Puede pensarse de la compresibilidad como un factor de corrección por el que deba multiplicarse el volumen del gas ideal para obtener el volumen real.

EJEMPLO: Calcular el volumen ocupado por 1 600 lb de metano a 60°F y 2 000 lb/plg² manométricas. La temperatura crítica del metano es −116.5°F y la presión crítica 673 lb/plg² manométricas.

---

* Con frecuencia se le llama factor de supercompresibilidad. Sin embargo, el superlativo no altera ni su valor ni su significado.

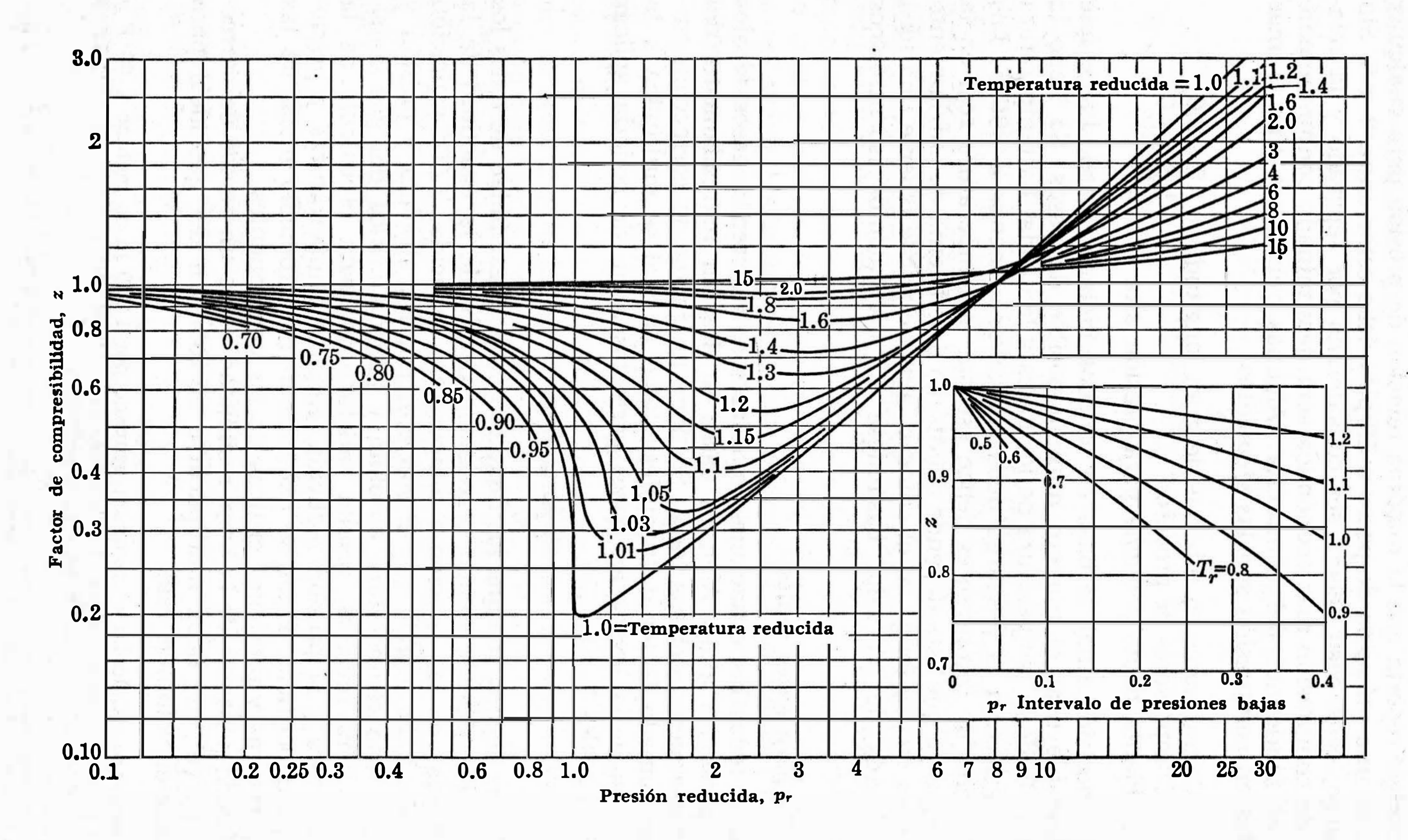


FIG. 15-20. Gráfica del factor de compresibilidad. [Reimpreso con permiso de O. A. Hougen y K. M. Watson, *Chemical Process Principles*, Vol. II, Pág. 489, John Wiley & Sons, Inc. (1947).]

SOLUCIÓN:

$$T_R = \frac{520}{343.5} = 1.52$$

$$P_R = \frac{2015}{673} = 3.00$$

De la Fig. 15-20, $z = 0.78$

$$\text{Base} \quad \frac{1600}{16} = 100 \text{ lb-moles de metano}$$

$$V = \frac{(100)(379)(14.7)(0.78)}{(2015)} = 216 \text{ pies}^3$$

La eficiencia-volumétrica de una máquina de pistón se ve afectada por las desviaciones que se tengan respecto del caso ideal; la falta de considerar estas desviaciones conduce a errores en lo que concierne a dimensiones del cilindro. La Ec. 14 que expresa la relación que se tiene entre eficiencia volumétrica, espacio muerto y relación de compresión, puede aplicarse a gases reales afectándolas por las correcciones de compresibilidad. El volumen expandido a las condiciones de succión es:

$$V_{1_c} = V_{2_c} \frac{z_1}{z_2} \frac{T_1}{T_2} \frac{P_2}{P_1}$$

Por lo general, no se conoce el valor de T_2, pero puede obtenerse a partir de la relación del gas ideal.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1-(1/k)}$$

Por lo tanto,

$$V_{1_c} = V_{2_c} \frac{z_1}{z_2} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k}$$

Por lo tanto,

$$E_v = 1 - C\left[\frac{z_1}{z_2}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} - 1\right] \quad (19)$$

donde los índices 1 y 2 se refieren a las condiciones de succión y descarga, respectivamente.

El ingeniero de proyecto deberá suministrar al fabricante de compresores los valores exactos de las compresibilidades de los gases a comprimir, para determinar correctamente el tamaño de los cilindros.

Si se dispone de un diagrama de entalpías del gas que se va a comprimir, podrán obtenerse en forma rápida y exacta los valores del trabajo isoentrópico y de la temperatura. La diferencia de entalpías, en Btu por libra mol, entre las condiciones inicial y final

para entropía constante, es equivalente al trabajo isoentrópico para un gas real (véanse los ejemplos ilustrativos). En caso de no tener diagramas de entalpías, pueden usarse gráficas generalizadas de entalpía tal como la de Hougen y Watson.[9] Usando estas gráficas generalizadas, se puede corregir la entalpía del gas ideal para obtener la entalpía del gas real, pero para hacer estos cálculos se debe proceder por tanteos, lo que consume algo de tiempo.

Para casi todos los casos no es necesario calcular exactamente la potencia teórica isoentrópica, existiendo métodos aproximados para calcularla. Se han propuesto numerosos métodos.[3,5,13a,14] Ridgway[13a] estudió el efecto de la compresibilidad de los gases en el diagrama indicador y propuso correcciones a los caballos de potencia obtenidos para el gas ideal, de acuerdo a las Ecs. 11, 11*a* o 12, para obtener los caballos de potencia para gases reales, multiplicando por el promedio aritmético de las compresibilidades de la succión y de la descarga. Este mismo procedimiento también puede deducirse a partir de la Ec. 9. El trabajo de compresión para un gas real puede estimarse de la siguiente manera:

$$-W_m = \int_1^2 v\,dP$$

$$\approx \frac{z_1 + z_2}{2} \int_1^2 RT\,\frac{dP}{P}$$

Para un gas ideal $\int_1^2 \frac{RT\,dP}{P} = (\Delta H')(778)$

$$\therefore W_m \approx \frac{z_2 + z_1}{2}\,\Delta H'(778)$$

o

$$-W_m = \frac{z_1 + z_2}{2}\,\frac{k}{k-1}\,P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right] \tag{20a}$$

y

$$-W_m = \frac{z_1 + z_2}{2}\,\frac{k}{k-1}\,RT^1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right] \tag{20b}$$

Debido a que la aproximación de Ridgway está basada en la corrección de los caballos de potencia para un gas ideal, k deberá ser evaluado a 0 lb/plg^2 y v debe ser el volumen específico del gas ideal (RT_1/P_1).

El método ha sido muy utilizado entre los ingenieros especializados en compresores, debido a lo fácil que resulta efectuar las correcciones de caballos de potencia del gas ideal al gas real.

Ejemplos ilustrativos de las técnicas del cálculo

Se tienen muchas ventajas en los cálculos de compresores cuando éstos se efectúan en base molal. La cantidad básica es independiente

de la presión y de la temperatura. Todas las fórmulas presentadas previamente están en base molal y los siguientes ejemplos ilustran su uso.

Ejemplo 1: Se va a seleccionar un compresor para comprimir 462 lb/min de nitrógeno puro a 80°F desde 14.7 lb/plg² abs hasta 40 lb/plg² abs.

Determínese: (*a*) potencia al freno; (*b*) el número de pasos; (*c*) diámetro del rodete; (*d*) la velocidad angular en rpm.

Propiedades del nitrógeno

Capacidad de calor molal: 6.97 Btu/(lb-mol)(°R)

Peso molecular: 28

$$k = \frac{6.97}{(6.97 - 1.987)} = 1.40 \qquad \text{y} \qquad \frac{k-1}{k} = \frac{1.4 - 1}{1.4} = 0.286$$

a. **Base:** $\frac{462}{28}$ **= 16.5 lb-moles por minuto.**

$$\text{Trabajo} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\frac{(P_2)}{(P_1)}^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.40}{1.40 - 1} (1544)(540)[(2.72)^{0.286} - 1]$$

$$= 966\,000 \text{ ft-\#/lb-mol}$$

$$= \frac{(966\,000)(16.5)}{33\,000} = 483 \text{ hp isoentrópico}$$

Volumen entrada $= (16.5)(379)\left(\frac{540}{520}\right) = 6500$ **pies³/min**

De las Figs. 15-16 y 15-17

$$\text{eficiencia isoentrópica} = (0.767)(0.955) = 0.733$$

$$\text{bhp} = \frac{483}{0.733} = 660 \text{ hp}$$

Debido a que se trata de compresión a baja presión no hay necesidad de corregir por desviaciones respecto al caso ideal. El suponer este caso como si fuera un gas ideal, queda dentro del intervalo de aproximación deseado.

b. **Número de pasos: usar 10 000 pies-#/lb por paso.**

$$\frac{966\,000}{(28)(10\,000)} = 3.45 \qquad \text{(Usar 4 pasos)}$$

$$\text{Trabajo por paso } \frac{966\,000}{(28)(4)} = 8\,630 \text{ pies-\#/(lb)(paso)}$$

c. **La selección del diámetro del rodete depende principalmente de la capacidad requerida de la máquina. En los datos del fabricante se indica un rodete de 18 plg de diámetro para una capacidad de 6 500 pies³/min en la entrada.**

De la Ec. 17:

d. $$N = \frac{1300}{18} \sqrt{\frac{8630}{0.55}} = 9050 \text{ rpm.}$$

Ejemplo 2: Se van a comprimir 1 800 pies³/min de gas natural estándar (60°F y 14.7 lb/plg² abs) en un compresor de pistón. La composición del gas es de 80.2 moles% de CH_4, 10.3% de C_2H_6, 6.5% de C_3H_8, 2.0% de i-C_4H_{10} y 1.0% de n-C_4H_{10}. El gas llega al compresor a 85 lb/plg² abs y 85°F

y se va a comprimir hasta 2 400 lb/plg² abs. Determine lo siguiente, primero suponiendo que es un gas ideal y después que es un gas real; suponer interenfriamiento completo entre los pasos y un espacio muerto de 10% para todos los cilindros: (*a*) el número de pasos, (*b*) potencia por cilindro, (*c*) potencia total al freno y (*d*) desplazamiento necesario por cilindro.

Bases: $\frac{1800}{379} = 4.75$ lb-moles/min.

PROPIEDADES DE LA MEZCLA GASEOSA

Componente	Moles, %	Peso molecular	Peso molar fraccional	Presión crítica lb/plg² abs	Presión crítica fraccional	Temperatura crítica, °R	Temperatura crítica fraccional
CH_4	80.2	16	12.8	673	539.0	343	275.0
C_2H_6	10.3	30	3.1	717	73.9	550	56.7
C_3H_8	6.5	44	2.9	642	41.7	666	43.3
i-C_4H_{10}	2.0	58	1.2	529	10.6	735	14.7
n-C_4H_{10}	1.0	58	0.6	544	5.4	766	7.7
	100.0	Promedio	=20.6	= Promedio P_c	670.6 lb/plg² abs	Promedio T_c	=397.4° R

$$\text{Gravedad específica} = \frac{20.6}{29} = 0.71$$

Compuesto	C_p molal* a 150°F	C_p fraccional = (C_p)(fracción mol)
CH_4	8.97	7.19
C_2H_6	13.78	1.42
C_3H_8	19.58	1.27
i-C_4H_{10}	25.82	0.52
n-C_4H_{10}	26.16	0.26
	Average C_p	10.66

* 150°F supuestos como temperatura promedio.

$$k = \frac{10.66}{10.66 - 1.987} = 1.23$$

$$\frac{k-1}{k} = \frac{1.23 - 1}{1.23} = 0.187$$

Con frecuencia los valores de k se encuentran tabulados. Estos pueden usarse en casi todos los cálculos ya que, por lo general, no se tiene mucha variación en el valor de la temperatura.

Suponiendo gas ideal

a. Suponiendo tres pasos.

$$\text{Relación de compresión} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} = \left(\frac{2400}{100}\right)^{1/3} = 2.9$$

Temperatura del gas en la descarga del cilindro (Ec. 10)

$$T_2 = 545(2.9)^{0.187} = 665° \text{ R o } 205° \text{ F.}$$

Con dos pasos la temperatura en la descarga resulta ser de 275°F la que es de valor alto.

Usar tres pasos.

Succión	*Descarga 1er. paso*	*2o. paso*	*3er. paso*
100 lb/plg² abs	290 lb/plg² abs	840 lb/plg² abs	Aproximadamente 2 400 lb/plg² abs

b. Potencia por paso. (Se desprecia la corrección por el incremento de presión necesaria para vencer la ΔP en el interenfriador.)

$$\text{Trabajo} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right]$$

Primer paso:

$$\frac{1.23}{1.23 - 1.0} (1544)(545)[(2.9)^{0.187} - 1] = 990\,000 \text{ pies-\#/lb-mol por paso}$$

Eficiencia de la tabla 15-1 = 82%

$$\text{bhp/cilindro} = \frac{(990\,000)(4.75)}{(33\,000)(0.82)} = 174 \text{ hp}$$

c. bhp total = (174)(3) = 522 hp

d. $$E_v = 1 - C\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} - 1\right] = 1 - 0.10\,[(2.9)^{1/1.23} - 1] = 0.86$$

u 86% para cada cilindro.
Desplazamiento en el primer paso:

$$\left(4.75 \frac{\text{lb-mol}}{\text{min}}\right)\left[\frac{(379)(14.7)}{(100)} \frac{\text{pies}^3 \text{ est}}{\text{lb-mol}}\right]\left[\frac{(545)}{(520)(0.86)} \frac{\text{pies}^3}{\text{pies}^3 \text{ est}}\right] = 322 \text{ pies}^3/\text{min}$$

Desplazamiento en el segundo paso:

$$(4.75)(379)\left(\frac{14.7}{290}\right)\left(\frac{545}{520}\right)\left(\frac{1}{0.86}\right) = 111 \text{ pies}^3/\text{min}$$

Desplazamiento en el tercer paso:

$$(4.75)(379)\left(\frac{14.7}{840}\right)\left(\frac{545}{520}\right)\left(\frac{1}{0.86}\right) = 38.4 \text{ pies}^3/\text{min}$$

Para los desplazamientos calculados anteriormente debe seleccionarse compresor estándar con cilindros de tamaño estándar. El fabricante da el valor de los espacios muertos exactos de las máquinas seleccionadas. Es muy importante, particularmente para compresores accionados con motores de gas, seleccionar el tamaño adecuado de los cilindros, de tal manera que la máquina se mantenga siempre con carga relativamente constante. De esta manera se obtiene bastante economía de combustible. Mast[12] presenta una descripción muy interesante del proceso para la selección del cilindro.

Gas real

a. El número de pasos no debe alterarse por las desviaciones del gas ideal.
b y *c.* Como una primera suposición considérese igual relación de compresiones por paso.

Se disponen de gráficas de entalpía para varios gases naturales. En la Fig. 15-21 (frente a Pág. 400) se reproduce una de estas gráficas para un gas

natural de gravedad específica 0.7. Esta puede usarse para el gas de este problema, ya que tiene propiedades que son muy similares. Haciendo referencia a la Fig. 15-21 la compresión para cualquier paso es seguida sobre una línea de entropía constante, desde la presión que se tiene en la entrada hasta la presión de la descarga. El interenfriamiento es trazado sobre una línea de presión constante.

	Btu/lb mol	bhp	Temperatura en la descarga °F
Primer paso	1750–450 = 1300	177*	215
Segundo paso	1520–350 = 1170	160	219
Tercer paso	1110–(−60) = 1170	160	225

A fin de tener igual trabajo por paso, se procede a la solución mediante tanteos, seleccionando la presión de la descarga del primer paso, lo que se puede obtener a partir de la gráfica. Para este ejemplo los valores supuestos resultan satisfactorios.

d. Desplazamiento (ilustrado sólo para el último paso)

$$E_v = 1 - C\left[\frac{z_2}{z_1}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} - 1\right]$$

$$1 - 0.10\left[\frac{0.89}{0.85}(2.9)^{1/1.23} - 1\right] = 1 - 0.15 = 0.85$$

$$\text{Desplazamiento} = \frac{(4.75)(3.79)(14.7)(545)(0.85)}{(840)(520)(0.85)} = 32.6 \text{ pies}^3/\text{min}$$

De igual manera se obtiene: primer paso—318 pies³/min
segundo paso—104 pies³/min

En algunos casos las desviaciones con respecto al gas ideal pueden ser muy grandes. Debe considerarse el efecto de estas variaciones sobre todo cuando se tienen presiones muy elevadas.

Otras soluciones. (Suponiendo que no se dispone del diagrama de Mollier) *para a, b y c.*

1. Método aproximado.

(Potencia ideal) (factor promedio de compresibilidad).

Cálculo del tercer paso:

Temperatura estimada en la descarga 205°F

Succión $T_R = \frac{T_1}{T_c} = \frac{545}{397} = 1.37 \qquad P_R = \frac{P_1}{P_c} = \frac{840}{671} = 1.25$

Descarga $T_R = \frac{T_2}{T_c} = \frac{665}{397} = 1.68 \qquad P_R = \frac{P_2}{P_c} = \frac{2400}{671} = 3.58$

Factores de compresibilidad (Fig. 15-20)

Succión $z = 0.85$
Descarga $z = 0.89$
Promedio $z = 0.87$

bhp = (174)(0.87) = 152 en cada cilindro†

c. bhp total = (152)(3) = 456 hp.

* $\frac{(1\,300)(778)(4.75)}{(33\,000)(0.82)} = 177$ hp.

† La diferencia que se tiene entre los resultados obtenidos usando la gráfica de entalpía se debe a inexactitudes en la lectura de las gráficas.

2. Hougen y Watson[9] ilustran muy bien otra manera de resolver el problema utilizando las gráficas generalizadas de entalpía y entropía cuando no se dispone del diagrama de Mollier.

Refrigeración

Los principios de compresión, discutidos anteriormente, se aplican también al ciclo de refrigeración. La American Society of Refrigeration Engineers y el Bureau of Standards han elaborado diagramas de Mollier para casi todos los refrigerantes industriales, por lo que resulta fácil calcular el trabajo isoentrópico. En estos diagramas puede seguirse el ciclo completo de refrigeración en lo referente a compresión, condensación y expansión. De hecho, la única dificultad que pudiera presentarse en los cálculos de refrigeración sería por lo que respecta a la terminología utilizada en la industria. Una ilustración de este punto la constituye la unidad de capacidad. Una tonelada de refrigeración por 24 hr es una definición arbitraria, que es equivalente a eliminar 200 Btu/min de calor del sistema.

REFERENCIAS

1. Baumeister, T., *Fans*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1935.
2. Church, A. H., *Centrifugal Pumps and Blowers*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1944.
3. *Compressed Air Handbook*, Compressed Air and Gas Institute, New York, 1947.
4. Dodge, B. F., *Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1944.
5. Edmister, W. C., *Ind. Eng. Chem.*, *32*, 373 (1940).
6. Elrod, H. G., Jr., *Ind. Eng. Chem.*, *37*, 789 (1945).
7. *Fan Engineering*, publicación de Buffalo Forge Co., Buffalo, N. Y., 1940.
8. Gill, T. T., *Air and Gas Compression*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1941.
9. Hougen, O. A. y K. M. Watson, *Chemical Process Principles*, Parte II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1947.
10. Karassik, I. J., *Chem. Eng.*, *54*, No. 10, 110; No. 11, 132; No. 12, 127 (1947); 55, No. 1, 118; No. 2, 134 (1948).
11. Kearton, W. J., *Turbo-Blowers and Compressors*, Pitman and Sons, Ltd., London, 1926.
12. Mast, B. T., *Petroleum Engr.*, *22*, No. 6, D-14 (1950).
13. O'Neil, F. W., *Compressed Air Data*, Revista de aire comprimido, New York, 1939.
13a. Ridgway R. S., *The Effect of Supercompressibility of Natural Gas Upon Compressor Performance*, presentado en California Natural Gas Association, Los Angeles, marzo 1, 1945.
14. York, R., Jr., *Ind. Eng. Chem.*, *34*, 535 (1942).
15. Young, V. W., *Basic Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.

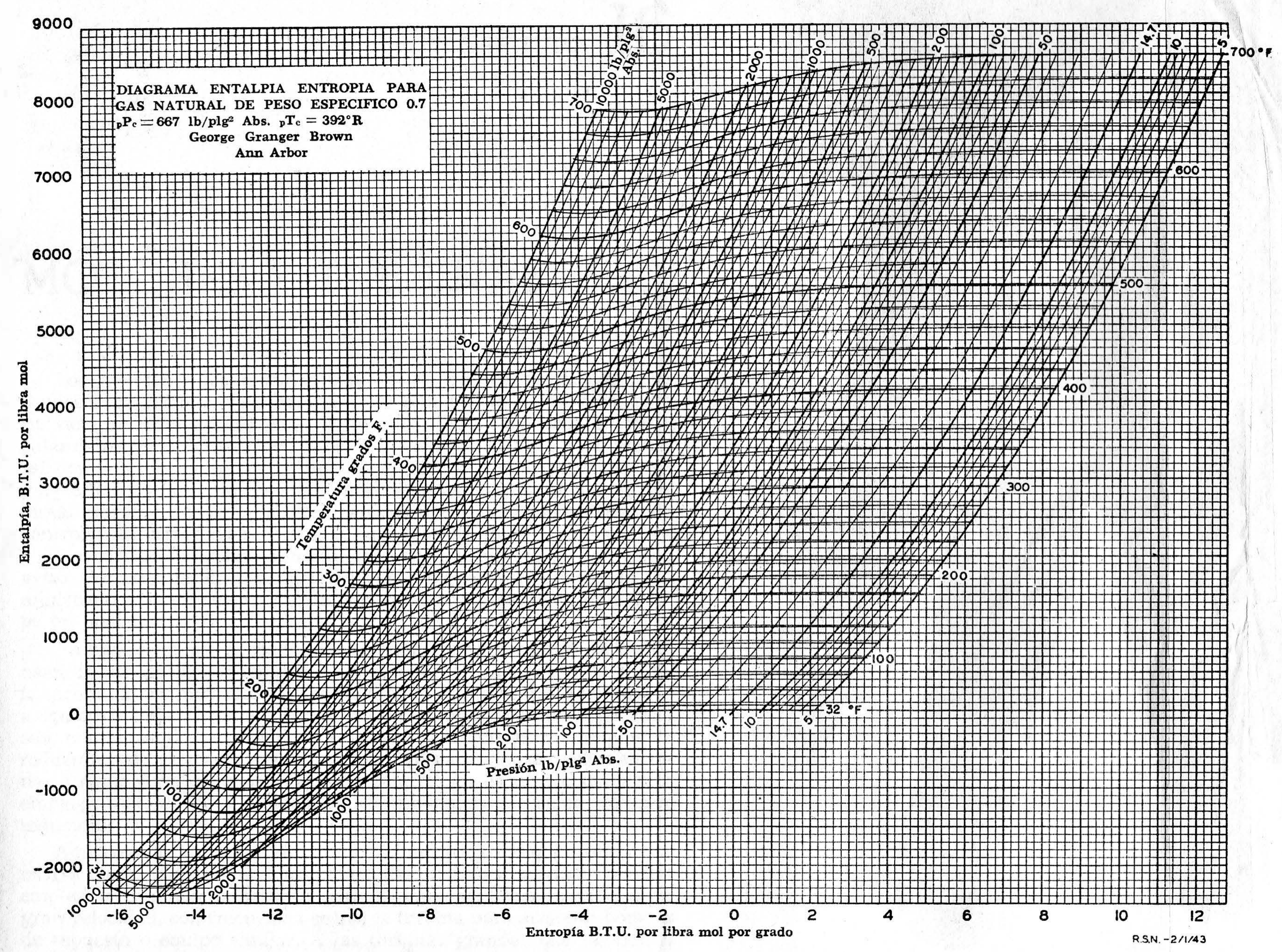


FIG. 15-21. Diagrama entalpía—entropía para un gas natural. [Reimpreso con permiso de George Granger, *Trans. AIME, 160,* 70 (1945)]

CAPITULO 16

MOTORES Y TURBINAS

Los motores y las turbinas son los equipos de propulsión más usados para accionar la maquinaria de una planta de proceso; pero no siempre resulta fácil elegir entre ellos. Para cada caso en particular deben considerarse los costos de la energía eléctrica y del vapor, así como la disponibilidad. Aun cuando los motores eléctricos son muy eficientes, las turbinas son más seguras. La operación de un motor eléctrico depende de otros equipos tales como mecanismos de control y transformadores, que aunque por lo general son seguros y útiles durante muchos años de servicio, pueden fallar sin previo aviso. Por otra parte, la turbina de vapor requiere solamente de suministro constante de vapor, y tal suministro raramente se interrumpe en una planta bien diseñada.

En lugares donde el costo de la energía eléctrica es alto, se podrá usar, dentro de las posibilidades, la turbina de vapor. Sin embargo, la turbina no es muy eficiente cuando se le usa para dar movimiento a equipo de baja velocidad. Debido a que las turbinas, por lo general, son máquinas de velocidad alta (3 000 a 5 000 rpm), requieren reductores de engranes, que resultan ser caros, para poder accionar a equipos de velocidad baja. En tales casos es más conveniente emplear motores de velocidad baja y no tener necesidad de usar reductores de velocidad.

Aun cuando los costos de la energía eléctrica indiquen que deba usarse motor eléctrico en una planta, las turbinas de vapor pueden emplearse con mucha ventaja para algunos servicios. Debido a su gran velocidad, con frecuencia se usa la turbina para accionar bombas de repuesto o equipo similar. A las turbinas grandes que no tienen condensador se les usa con doble propósito, para impulsar alguna bomba o compresor grande, y para suministrar vapor de baja presión que se necesite para fines de calentamiento en algún proceso de la

planta. Al suministrar vapor de presión alta a la entrada de la turbina, el vapor de la salida puede usarse para fines de calentamiento. Además, el vapor en la salida de turbinas y máquinas de pistón está libre de aceite y de otros contaminantes.

Aun cuando el detalle de los diseños de los motores eléctricos y de las turbinas le es confiado a especialistas, al ingeniero de proyectos le resultará muy conveniente entender algunos de los principios fundamentales de operación y conocer los tipos de motores y turbinas que se fabrican.

PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LA OPERACION DE UN MOTOR

Cuando los polos de un magneto se colocan frente a frente, tal como se muestra en la Fig. 16-1, las líneas de fuerza magnética en el entrehierro se dirigen en línea recta de norte a sur. Un conductor eléctrico que conduce corriente, produce también un campo magnético alrededor del alambre. Los estudiantes visualizan la dirección de este campo aplicando la regla de la mano derecha apuntando con el dedo pulgar en la dirección de la corriente. Los otros cuatro dedos indican el sentido de la rotación del campo magnético alrededor del conductor. Para fines ilustrativos se indica con un punto en un círculo pequeño que la corriente fluye hacia el lector, y una cruz indica que la corriente se aleja del lector, tal como está indicado en la Fig. 16-2.

Si el conductor mostrado en la Fig. 16-2 se coloca en el entrehierro, entre los dos polos del magneto de la Fig. 16-1, dará como resultado el campo que se muestra en la Fig. 16-3. Las líneas de fuerza que se tienen por encima del conductor se suman a las del flujo del magneto, y las que se tienen por debajo del conductor se restan a las del flujo del magneto. Esta situación produce la fuerza resultante hacia abajo mostrada en la Fig. 16-3. Si el conductor permanece fijo y el magneto tiene libertad de movimiento, esta fuerza resultante causará movimiento al magneto. Recíprocamente, si el magneto permaneciera fijo, el conductor tendería a moverse. Aunque un tanto simplificados, estos principios básicos explican el funcionamiento de los motores.

ESTANDARES DE LOS MOTORES

Quizá ningún otro equipo de proceso ha sido tan cuidadosamente estandarizado como el motor eléctrico. La National Electric Manufacturers' Association publica y revisa regularmente las normas o estándares de motores y generadores. A estas normas por lo general se les conoce como normas o estándares de la NEMA.[9] En las mis-

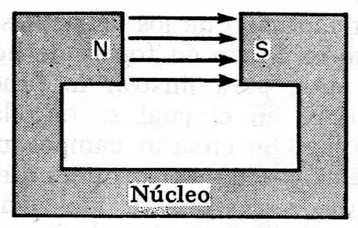


FIG. 16-1. Campo magnético alrededor de un magneto permanente

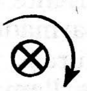


FIG. 16-2. Dirección del campo magnético en un conductor eléctrico.

mas se incluyen clasificación estándar, dimensiones, pruebas y clasificación de todos los tipos de motores. Además, la National Electric Code (soporte de la National Board of Fire Underwriters, de la National Fire Protection Association y de la American Standards Association) bosqueja métodos para instalación de motores y da instrucciones completas para su uso en locales que ofrezcan algún peligro para su operación. Este código ha sido convenientemente interpretado y resumido en manuales.[1] La Underwriters Laboratory Inc., tiene publicadas las normas para la construcción de partes y accesorios de los motores eléctricos.

TIPOS DE MOTORES ELECTRICOS Y APLICACIONES

Motores de corriente directa

Se puede producir un campo magnético muy fuerte si el magneto que se muestra en la Fig. 16-3 se reemplaza por un núcleo de hierro, alrededor del cual se tiene un alambre enrollado en forma de bobina. Se producirá un campo magnético muy fuerte al pasar una corriente a través del alambre.

Si se sustituye el conductor mostrado en la Fig. 16-3, por una espira (arrollamiento en forma de hélice), tal como se muestra en

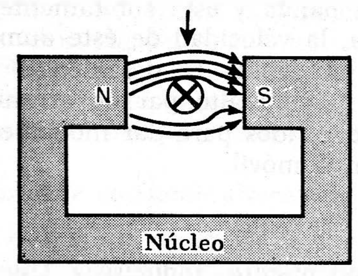


FIG. 16-3. Distorsión de un campo magnético por la introducción de un conductor

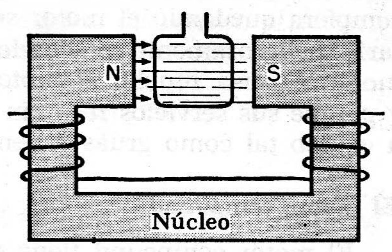


FIG. 16-4. Motor de corriente directa, simplificado

la Fig. 16-4, se tendrá entonces una ilustración de los principios del motor de corriente directa. Al alambre arrollado en forma de hélice se le llama armadura (o al menos sirve para ilustrar la función de la armadura), y al núcleo de hierro en el cual se enrolla el alambre se le llama campo de la bobina. Se crearán campos magnéticos en la armadura y en la espira al pasar una corriente directa a través de ellos. El polo sur de la armadura será atraído hacia el polo norte del campo de la bobina, causando rotación de la armadura. En el momento en que los polos norte y sur están opuestos uno al otro se tiene un dispositivo llamado "conmutador", el cual regresa el flujo de la corriente a la armadura provocando de nuevo el movimiento. El proceso se repite en forma continua. En un motor estándar la armadura se hace de un cierto número de espiras y puede consistir de dos o más polos.

Esta discusión es una descripción muy simplificada del motor de corriente directa. El lector podrá encontrar más detalles en libros de ingeniería eléctrica.[4,11,12]

Se tienen tres tipos básicos de motores de corriente directa.

Motor con devanado en derivación

El motor de corriente directa con devanado en derivación es aquel en el que las bobinas del campo y la armadura están conectadas en paralelo. Con este arreglo, la corriente que pasa a través del campo del circuito, es de muy bajo valor. Los motores con devanado en derivación operan prácticamente a velocidad constante, independientemente de la carga.

Motor con devanado en serie

Un motor con devanado en serie tiene los circuitos de los campos y la armadura conectados en serie. Al disminuir la carga, disminuye la corriente en la armadura y aumenta la velocidad del motor. Si el motor transmitiera el movimiento con banda y ésta súbitamente se rompiera quedando el motor sin carga, la velocidad de éste aumentaría peligrosamente pudiendo llegar a causar la destrucción del motor. Se usa mucho el motor serie por su alto par de arranque y porque sus servicios resultan muy adecuados para dar movimiento a equipo tal como grúas y demás equipo móvil.

El motor compound

El motor compound tiene dos arrollamientos inductivos. Uno se conecta en paralelo con la armadura y el otro se conecta en serie. Como es de suponerse, estos motores combinan las ventajas de los motores serie y de derivación. Tienen par de arranque relativamente alto y aumentan su velocidad, aunque no en forma excesiva, cuando

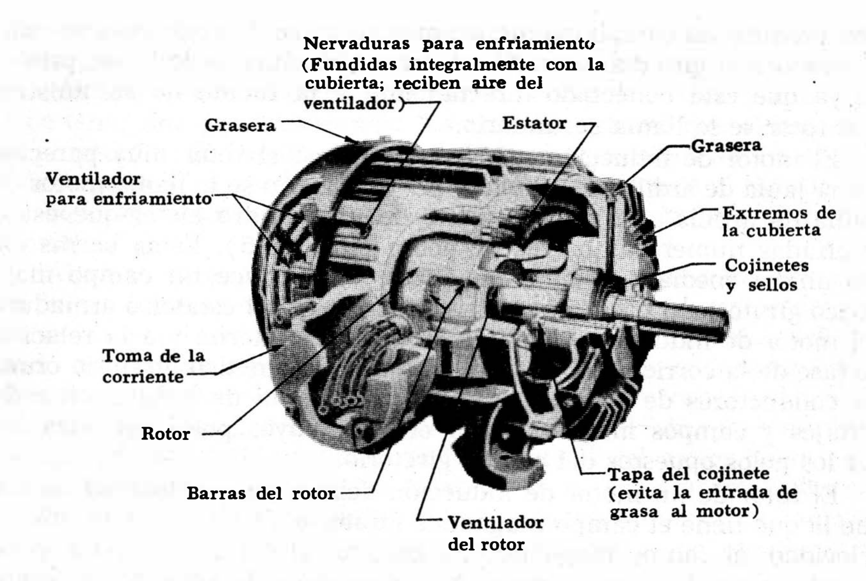


FIG. 16-5. Motor de jaula de ardilla a prueba de explosión (cortesía de Allis-Chalmers Company).

disminuye la carga. Son muy usados con equipos en los que la carga es variable y no se requiere tener velocidad constante.

Los motores de corriente directa no deben arrancarse con carga completa. Es necesario utilizar un arrancador de gran resistencia, de tal manera que la corriente pueda aumentarse gradualmente hasta que el motor alcance su velocidad normal.

No obstante el gran costo inicial del motor de corriente directa en comparación con el motor de corriente alterna, hay casos en los que se le prefiere por su gran facilidad para el control de su velocidad. La velocidad en estos motores puede variarse ya sea cambiando el voltaje en la armadura o cambiando la resistencia del campo magnético. Al reducir la resistencia del campo magnético se aumenta la velocidad del motor, mientras que ésta se disminuye al reducir el voltaje en la armadura. Ambas operaciones pueden efectuarse, respectivamente, introduciendo resistencia variable en serie con las bobinas del campo o con el devanado de la armadura.

Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna se dividen en dos tipos generales: motores de inducción y motores sincrónicos.

Motores de inducción

El motor de inducción es el que más se emplea en las industrias. La corriente que pasa por el estator o parte fija del motor de induc-

ción produce un campo magnético que, como se describe más adelante, produce el giro del rotor. Al estator o armadura se le llama primario ya que está conectado directamente a la fuente de suministro, y al rotor se le llama secundario.

El motor de inducción más popular tiene el rotor muy parecido a una jaula de ardilla en rotación; por esta razón se le llama motor de "jaula de ardilla". El rotor consiste de un cilindro en el que están insertadas numerosas barras de cobre (Fig. 16-5). Estas barras están unidas mediante anillos metálicos. Se produce un campo magnético giratorio al pasar una corriente a través del estator o armadura del motor de inducción, debido a la corriente alterna y a la relación de fase de la corriente polifásica. El campo magnético giratorio cruza los conductores de cobre que están en la jaula de ardilla, creando voltajes y campos magnéticos en el rotor cuyos polos son atraídos por los polos opuestos del campo giratorio.

El rotor de un motor de inducción debe girar a velocidad menor que la que tiene el campo magnético giratorio. Si girasen a la misma velocidad, el campo magnético no cortaría al campo del rotor y no se induciría voltaje en el rotor. A la diferencia de velocidades angulares entre el rotor y el campo giratorio se le llama "deslizamiento" y por lo general, se expresa en forma de porcentaje de deslizamiento.

La velocidad angular del campo giratorio se calcula de acuerdo al campo necesario para que la fuerza electromotriz se aplique a través de un ciclo completo para cada par de polos. Por lo tanto, la velocidad del campo giratorio es

$$\text{rpm} = \frac{60f}{P/2} = \frac{120f}{P}$$

donde f = frecuencia en ciclos por segundo
P = número de polos

Esta velocidad es la llamada velocidad sincrónica del motor. La velocidad real de un motor de inducción es la velocidad sincrónica corregida por el deslizamiento.

$$\text{Velocidad real} = \text{velocidad sincrónica}\left(\frac{100 - \%\ \text{deslizamiento}}{100}\right)$$

El motor de jaula de ardilla es excelente, por su robustez y economía, para usarse en un intervalo amplio de potencias. Modificando el diseño del rotor del motor de jaula de ardilla, principalmente al cambiar la localización de las barras del rotor con respecto de la periferia, podrían obtenerse motores de características muy variadas, desde bajo hasta alto par de arranque y desde bajo hasta alto deslizamiento. En general, el motor de inducción más usado es el de par y corriente normal de arranque. Con frecuencia se especifi-

can motores de alto par de arranque y baja corriente para equipos tales como compresores bajo carga que requieren par de arranque grande. Para estos diseños, el material de las barras de los motores debe tener una gran resistencia. Es muy importante que el ingeniero de proyecto se dé cuenta que se fabrican muchos tipos de motores de inducción, y el ingeniero electricista debe especificarle el tipo de motor con las mejores características eléctricas, según sea el trabajo a realizar.

Algunas veces se usa el motor de inducción de rotor devanado en lugar del motor de jaula de ardilla. Un motor de rotor devanado se compone de bobinas aisladas, arregladas para formar determinado número de polos en el rotor que son iguales en número a los que se tienen en el estator. Este motor puede arrancarse con corriente baja, agregándole resistencia externa al circuito del rotor. De igual forma puede controlarse la velocidad del motor hasta aproximadamente un valor igual a la mitad de su valor normal. Sin embargo, el motor de rotor devanado es más caro que el de jaula de ardilla y, por lo tanto, sólo se le usa en sistemas que requieren corrientes altas para su arranque.

El estator del motor monofásico de inducción tiene solamente un devanado y, por lo tanto, el campo magnético no tiene movimiento, aunque se tienen cambios de la polaridad En estos motores, al hacer girar el rotor con la mano para cruzar el campo magnético, la rotación continuará en forma automática al continuarse cruzando el campo magnético del estator. Desde luego que no es deseable tener arrancado a mano y se han diseñado algunos sistemas automáticos. El sistema de arranque más común es con motor de fase partida, el cual está equipado con un devanado auxiliar para diferir en su posición magnética del devanado principal. El devanado principal, o primario, y el devanado auxiliar producen un par en el rotor que causa giro del mismo al aplicarle una corriente. El circuito se abre cuando el rotor adquiere su velocidad normal de operación. Se fabrican varios diseños de motores de fase partida.[4, 11, 12]

Es interesante notar que se puede cambiar la rotación en los motores de inducción polifásica, intercambiando las conexiones de dos cualesquiera de sus terminales. En cambio, el motor monofásico rotará en la dirección que lo arranca el dispositivo auxiliar de arranque. Para cambiar la rotación en un motor monofásico se requiere hacer un cambio en el dispositivo de arranque.

Con frecuencia se usan los motores monofásicos para potencias pequeñas, particularmente para operaciones de potencia fraccional. Aun cuando los motores polifásicos de potencia fraccional pueden fabricarse de construcción simple y económica, su uso no es muy conveniente pues requiere llevar corriente polifásica al lugar de la instalación. Al necesitarse de una bomba o máquina pequeña en algún lugar remoto de la planta, el motor que las accione podrá

tomar su energía de la línea monofásica utilizada para el alumbrado, sin necesidad de instalar línea trifásica.

Motores sincrónicos

Como su nombre lo indica, el rotor del motor sincrónico gira a la misma velocidad que el campo devanado del estator. Por lo tanto, el campo magnético del estator debe ser inducido por otros medios que no sean cruzamiento de líneas de flujo creadas en el primario o estator. La corriente del campo del rotor es generada por un pequeño generador de corriente directa llamado excitador, el que puede estar, o no, conectado al motor sincrónico.

El motor sincrónico es arrancado como los motores de inducción. Debido a la excitación, los polos del rotor se mueven con el campo giratorio de la armadura hasta alcanzar la velocidad sincrónica.

La velocidad de un motor sincrónico depende de la frecuencia de la fuente de suministro, y proporciona servicio a velocidad constante. Sin embargo, la velocidad constante no constituye su principal ventaja. Las principales ventajas son:

1. Pueden fabricarse para trabajar a velocidades muy bajas (menores de 500 rpm) y eficiencias altas; por lo tanto, son muy útiles para usarlos en máquinas de movimiento lento tales como compresores de pistón.

2. Con frecuencia el costo del motor sincrónico es más bajo que el motor de inducción para velocidades bajas y potencias grandes.

3. El motor sincrónico puede diseñarse para operar con un factor de potencia adelantado, lo que es una ventaja cuando es muy grande el valor de la carga inductiva en la planta. El factor de potencia adelantado del motor sincrónico tiende a cancelar el factor de potencia atrasado del motor de inducción.

Arrancado de los motores de corriente alterna

Los motores monofásicos pequeños, invariablemente se arrancan aplicando el voltaje total a través de la línea. Los motores de inducción de jaula de ardilla pueden arrancarse aplicando el voltaje total de la línea. Para este servicio se fabrica equipo de arranque estándar, el que puede ser operado manual o magnéticamente.

Los motores sincrónicos de baja velocidad, con frecuencia son arrancados aplicando el voltaje total de la línea; pero a los de alta velocidad es preferible arrancarlos con voltaje reducido para, gradualmente, tomar corriente del circuito de potencia. Se usan, en este caso, arrancadores de resistencia y autotransformadores de voltaje reducido, los que se usan también con los motores de inducción de jaula de ardilla cuando se desea reducir la corriente del arranque,

a fin de no perjudicar las demás cargas que se tengan en el circuito de potencia.

DISEÑO Y SELECCION DE MOTORES

Clasificación

La National Electric Manufacturers Association[9] clasifica los motores* de acuerdo a la protección mecánica y métodos de enfriamiento, de la siguiente manera:

Clasificación de los motores de acuerdo a la protección mecánica y métodos de enfriamiento

Lista abreviada usada para plantas de proceso. Adaptada de los estándares de la National Electrical Manufacturers Association.[9]

I. Máquinas abiertas.

Una máquina abierta es aquella que tiene aberturas de ventilación las que permiten el paso de aire exterior para enfriar por encima y alrededor de los devanados.

A. Máquina a prueba de goteo.

Una máquina a prueba de goteo es una máquina abierta en la que las aberturas para ventilación están dispuestas en tal forma que las gotas de líquidos o partículas de sólidos, que caigan en la máquina a cualquier ángulo no mayor de 15 grados respecto de la vertical, no puedan introducirse a la máquina ni directamente ni por choque contra alguna superficie horizontal o inclinada del interior de la misma.

B. Máquina a prueba de salpicaduras.

Una máquina a prueba de salpicaduras es una máquina abierta, en la que las aberturas para ventilación están diseñadas de tal forma que no puedan introducirse a la máquina las gotas de líquidos o partículas de sólidos que le lleguen en línea recta, o a un ángulo cualquiera menor de 100 grados respecto de la vertical.

II. Máquina blindada.

Una máquina blindada es aquella que se encuentra encerrada para impedir el paso del aire entre el interior y el exterior de la cubierta, pero no lo suficientemente encerrada como para que sea hermética o a prueba de aire.

A. Máquina blindada no ventilada.

Una máquina blindada no ventilada es una máquina totalmente encerrada sin enfriamiento, por medios externos, de sus partes interiores.

B. Máquina blindada con ventilador para enfriamiento.

Una máquina blindada con ventilador para enfriamiento es una máquina totalmente encerrada, equipada para tener enfriamiento

* Por brevedad se omiten varias categorías menos importantes listadas en la NEMA.

exterior mediante un ventilador o ventiladores integrados con la máquina, pero colocados externamente.

C. Máquina a prueba de explosión.

Una máquina a prueba de explosión es una máquina blindada cuya cubierta está diseñada y construida para resistir la explosión de un gas o vapor específico, explosión que puede ocurrir dentro de la misma, para prevenir la ignición por chispas o flamazo del gas o vapor que rodea la máquina que pueda provocar la explosión dentro de la cubierta de la máquina.

D. Máquinas a prueba de explosión de polvos.

Una máquina a prueba de explosión de polvos es una máquina blindada cuya cubierta está diseñada y construida de tal manera que no pueda ocurrir la ignición o explosión de la atmósfera del polvo específico manejado, así como también para que no cause la ignición del polvo que rodea a la máquina.

E. Máquina a prueba de agua.

Una máquina a prueba de agua es una máquina blindada construida de tal modo que puede rechazar al agua que le llegue por corrientes o de algún tubo específico, excepción hecha de las fugas que puedan ocurrir alrededor del eje que evitaría la entrada del aceite proveniente del depósito, debiendo tener la máquina drenado automático. El drenado puede efectuarse por medio de una válvula de retención o por tubería conectada a una salida practicada en la parte inferior de la cubierta.

Motores blindados usados en las plantas de proceso

Kropf[7] presenta una tabla muy interesante (Tabla 16-1) en la que muestra los costos relativos de los motores blindados y sus controles. Se tienen muy pocas diferencias entre los motores a prueba de goteo y a prueba de salpicadura, y de consecuencias mínimas en los motores chicos. Lo mismo puede decirse de los motores blindados y de los de a prueba de explosión.

En las plantas de proceso se tienen áreas de trabajo en las que se tienen riesgos durante su operación, resultando, ventajoso por lo mismo, tener en existencia motores a prueba de explosión. Este procedimiento permite la intercambiabilidad de motores en toda la planta y se evitan errores innecesarios. Sin embargo, en ciertas plantas en que la atmósfera de trabajo no ofrece ningún riesgo, pueden usarse motores a prueba de agua y de esa manera ahorrarse una considerable cantidad de dinero.

Kropf enfatiza la necesidad de que el equipo arrancador esté localizado fuera de las áreas peligrosas, o en cuartos que estén especialmente ventilados para evitar el uso de arrancadores y controles a prueba de explosión. La razón de esto puede realmente observarse en la Tabla 16-1.

TABLA 16-1. COSTOS RELATIVOS DE MOTORES BLINDADOS Y SUS CONTROLES*

Cubierta	Costo relativo aproximado
Para motores	
Abiertos—a prueba de goteo	100%
A prueba de salpicadura	109
Blindado con ventilador para enfriamiento	145
Blindado con ventilador para enfriamiento a prueba de explosión	165
Para controles	
Abiertos (con tablero fabricado)	100%
Fines generales	117
Hermético al polvo	161
A prueba de humedad	203
A prueba de explosión (polvos)	240
A prueba de explosión (vapores)	316

* Reimpreso con permiso de, Kropf, Victor J., *Chem. Eng.* 58, No. 7, 123 (1951).

Funcionamiento en áreas de peligro

La National Electric Code[1] define cuáles son las áreas de trabajo con riesgo o peligro. Se fabrican motores y equipos de control para las áreas cuyos riesgos se especifican más abajo.

Areas de peligro

Lista abreviada aplicable a plantas de proceso. [Adaptada con permiso de *National Fire Codes*, Vol. V (National Electric Code), Nacional Fire Protection Assoc., Boston (1953).]

Clase I. Gases o vapores altamente inflamables.

División 1. Atmósferas peligrosas que se tienen continuamente o que se pueden tener durante el curso normal de funcionamiento.

División 2. Líquidos inflamables manejados y procesados pero que normalmente están confinados.

División 3. Lugares donde se depositan pinturas inflamables, o acumulación de productos análogos.

Clase II. Combustibles en polvo.

División 1. Polvo suspendido continuamente en el aire o durante el curso normal de funcionamiento.

División 2. Suspensión de polvo, no únicamente en los lugares donde están los depósitos que puedan encenderse por chispa.

Clase III. Fibras combustibles volátiles.

División 1. Lugares en donde se manejan o usan fibras inflamables.

División 2. Lugares donde se almacenan fibras que se puedan quemar fácilmente.

El equipo para estas tres clases de atmósferas puede ser experimentado y aprobado para los siguientes tipos de atmósferas:

Grupo *A*. Atmósferas que contengan acetileno.
Grupo *B*. Hidrógeno o gas fabricado.

Grupo *C*. Vapor etilo de éter.

Grupo D. Gasolina, petróleo, nafta, alcoholes, lacas solventes, vapores, acetona, gas natural.

Grupo *E*. Polvos de metales.

Grupo *F*. Negro de humo, polvo de hulla o de carbón mineral.

Grupo *G*. Polvos de fibras.

De la lista anterior es posible decidir el grupo que le corresponde al material manejado.

Características mecánicas

Se han producido mejorías en el diseño de los motores; esto debido a la gran competencia que se tiene. En la Fig. 16-5 se muestra un motor típico moderno. Además de las características eléctricas discutidas anteriormente, el eje del rotor está soportado en cojinetes o chumaceras colocadas en los extremos de las cubiertas; las chumaceras pueden ser del tipo de camisa, lubricadas con aceite, o cojinetes de bolas lubricadas con grasa. Los cojinentes de bolas son muy empleados por el poco mantenimiento que requieren y la limpieza inherente que con ello se logra. Los motores eléctricos se acoplan directamente, mediante acoplamientos flexibles, a las máquinas impulsadas, tales como bombas y compresores centrífugos. También se usan bandas, engranes y transmisión con cadena. Se tienen, además, motores con engranes soportados en la misma cubierta del motor. Estos motores con engranes pueden diseñarse para velocidad variable.

Capacidades de los motores

La potencia expresada en caballos, que es la característica más importante del motor, representa la energía en la flecha de salida. Las potencias expresadas en caballos, especificadas por la NEMA, son: 1/20, 1/12, 1/8, 1/6, 1/4, 1/3, 1/2, 3/4, 1, 1 1/2, 2, 3, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 75, 100, 125, 150 y 200 (para los tamaños fraccionarios las más populares son desde 1/4, 1/2 y 3/4). Además debe especificarse la velocidad del motor en rpm a plena carga y a varios porcentajes de la carga total, el voltaje, el amperaje a plena carga, el número de fases y la frecuencia de la corriente alterna.

Son también muy importantes las características térmicas del motor; se especifican en la placa externa que tienen todos los motores, como el aumento permitido de temperatura arriba de la temperatura ambiente para condiciones de operación continua. La temperatura ambiente para operaciones de casi todos los motores no debe exceder de 40°C, y el aumento admisible de temperatura es hasta 40°C. Para motores blindados se especifican aumentos admisibles de temperatura hasta de 55°C y con aislamiento especial hasta de 75°C. Se tienen nuevos tipos de motores para fines especia-

les, aislados con silicio como material base y que pueden funcionar a temperaturas muy elevadas. El trabajar los motores por periodos prolongados a una potencia excedida a la normal, traerá como consecuencia aumento en la temperatura del motor, que puede ser mayor al aumento admisible, lo que podrá ocasionar un acortamiento de la vida del motor o una falla en el mismo.

Casi todos los fabricantes de motores producen sus unidades de acuerdo a las normas de NEMA revisadas en 1952. Los cambios en los nuevos diseños son efectuados hasta después de 1955. Estos diseños nuevos producen unidades de menor tamaño para las capacidades especificadas.

TABLA 16-2. VOLTAJES SUGERIDOS PARA MOTORES*

	Motores de potencia no fraccional		Motores de potencia fraccional		
Voltaje nominal del sistema	Polifásico	Monofásico	Polifásico	Monofásico	Potencia del motor (hp)
120	110	115	110	115	hasta 5
120/208 Y	110/220	115	110/220	115	hasta 7½
240	220	230	220	230	½ a 200
480	440	...	440	...	½ a 1,000
600	550	...	550	...	½ a 1,000
2,400	2,300	...	...	...	50 y más
4,160	4,000	...	...	...	150 y más
4,800	4,600	...	...	...	250 y más
6,900	6,600	...	...	...	500 y más
13,800	13,200	...	...	...	1,000 y más

* Reimpresa con permiso de Kropf, Victor J., *Chem. Eng.*, 58 No. 7, 123 (1951).

Nota: Estos son los valores de la potencia admisible para los voltajes indicados. La selección del voltaje del motor depende de los costos del motor y de la distribución del sistema en particular. Una selección típica para una planta que tenga voltajes en los ramales de valores 120, 480, 2 400 y 4 180 y alimentación de 13-800 podría ser:

Motor de potencia	Voltaje del motor
fraccional	110 una fase
1–150	440
150–1 000	2 300 o 4 000
1 000 y más	13 200

Selección de motores

Aun cuando la selección de un motor para un determinado servicio debe hacerla un ingeniero electricista competente, es necesario

que el ingeniero de proyecto suministre la información necesaria para que se haga la selección más adecuada. Deben especificarse muy claramente las características de las máquinas a impulsar. Deben darse los datos de potencia necesaria, velocidad de rotación (rpm) y variaciones de la velocidad. Además debe especificarse la posibilidad de sobrecargas, la variabilidad de las cargas, la magni-

Aplicaciones típicas	Motores de C. A.								C. D.		
	Jaula de ardilla par normal	Jaula de ardilla par alto	Jaula de ardilla alto deslizamiento	Rotor devanado	Sincrónico	Monofásico par bajo	Monofásico par medio	Monofásico par alto	Devanado en derivación	Devanado compound	Devanado en serie
Agitadores ½ a 15 hp	■			■			■		■		
Molinos de bola y desgaste, 20-900 hp		■		■	■				■	■	
Mezcladoras (Banbury), 200 a 900 hp	■				■						
Batidoras, hasta 200 hp		■		■	■						
Sopladores, hasta 500 hp	■			■	■		■		■		
Elevadores de cangilones, 5 a 25 hp			■	■						■	■
Desmenuzadoras, hasta 1 500 hp			■	■	■						
Compresores, hasta 600 hp		■		■	■			■		■	
Transportadores, 3 a 100 hp		■	■	■					■	■	
Grúas y montacargas, 3 a 150 hp			■	■					■	■	■
Trituradores, 5 a 300 hp		■		■	■					■	
Extractores, 3 a 100 hp			■	■						■	
Ventiladores, hasta 150 hp	■				■	■			■		
Moledora (pasta), 1 000 a 4 000 hp					■						
Esmeriladora y granuladora, ¼ a 30 hp	■						■		■	■	
Trituradora, 20 a 200 hp		■	■	■	■					■	
"Jordans", hasta 400 hp	■				■						
Hornos secadores, 20 a 100 hp				■					■		
Mezcladores, 2 a 200 hp	■			■	■		■		■		
Pulverizadores, 10 a 250 hp				■	■					■	
Bombas (centrífugas), hasta 1 000 hp	■				■		■		■		
Bombas (de pistón), hasta 200 hp		■		■	■			■	■	■	
Desfibradoras, 5 a 300 hp	■			■	■				■		
Alimentadores de hornos, 5 a 50 hp	■	■		■			■				

Tipos de arrancador	
Jaula de ardilla	Magnético, voltaje completo o reducido.
Rotor devanado	Manual, semimagnético o magnético con resistencia en el secundario.
Sincrónico	Magnético, voltaje completo o reducido.
Monofásico	Manual o magnético, voltaje completo.
Corriente directa	Manual o magnético con resistencia en el campo y en la armadura.

FIG. 16-6. Aplicaciones típicas de motores para plantas de procesos. [Reimpreso con permiso de Victor J. Kropf, *Chem. Eng.* 58, No. 7 123 (1951).]

tud de los pares de arranque, si el servicio es intermitente, y la frecuencia del arrancado. Deben definirse, además, las condiciones atmosféricas, incluyendo la posibilidad de tener áreas peligrosas o de gases corrosivos.

También debe proporcionarse al ingeniero electricista una descripción completa del suministro de energía eléctrica, costo de la

energía y una lista de los equipos que consumen energía en la planta, todo ello para hacer una mejor selección de motores y equipo de control para lograr la máxima economía y el máximo factor de potencia. La selección del voltaje más apropiado para un motor determinado constituye un aspecto muy importante; Kropf[7] reproduce en la Tabla 16-2 los voltajes recomendables a usar con los motores. Estas sugerencias están basadas en las experiencias obtenidas en un número de plantas, y su uso general puede ser de gran valor.

La discusión del motor más adecuado para varias aplicaciones en una planta de proceso puede ser muy prolongada y resulta peligroso hacer generalizaciones. Sin embargo, Kropf[7] presenta una recopilación muy interesante (Fig. 16-6) que puede ayudar a entender algunas de las aplicaciones más comunes de los diferentes tipos de motores eléctricos empleados en las plantas de proceso.

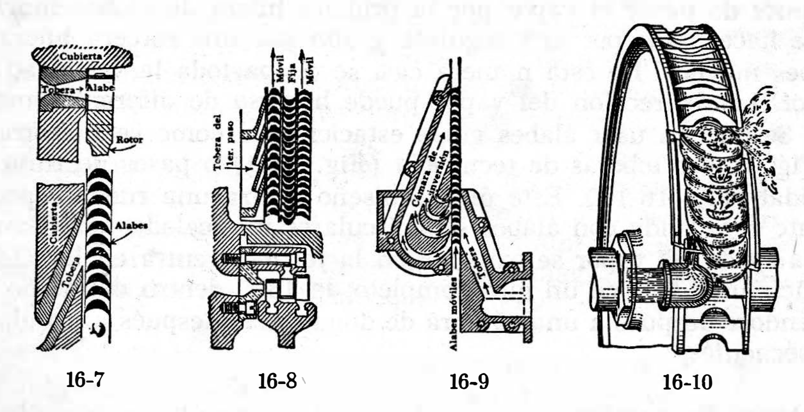


FIG. 16-7. Turbina de impulso de un paso de velocidad. [Reproducida con permiso de R. T. Kent. *Mechanical Engineers Handbook*, Vol. II, 12a. Ed., John Wiley & Sons, (1950).]

FIG. 16-8. Turbina de dos ruedas mostrando álabes guía fijos (misma referencia Fig. 16-7).

FIG. 16-9. Tobera de reentrada (misma referencia Fig. 16-7).

FIG. 16-10. Paso de flujo helicoidal (misma referencia Fig. 16-7).

TURBINAS DE VAPOR

Clasificación

Las turbinas pueden clasificarse de una manera general en dos subdivisiones, basadas en el modo de efectuar la transformación de la energía calorífica a energía mecánica. La turbina de impulso produce el movimiento del rotor por la fuerza creada por el choque del chorro de vapor contra los álabes. La turbina de reacción produce

el movimiento debido a la reacción de chorros de vapor fijos al disco giratorio. Se tienen muchos ejemplos de cada una de las clasificaciones. La siguiente lista breve representa algunos de los tipos más importantes.

Turbinas de impulso

a) TURBINAS DE IMPULSO DE UN PASO DE VELOCIDAD. Este es quizá el tipo más común de turbina. En la Fig. 16-7 se le muestra esquemáticamente. El vapor se expansiona completamente en la tobera y los álabes móviles reciben este vapor, transformando su energía cinética en trabajo.

b) TURBINAS DE VARIOS PASOS DE VELOCIDAD. A fin de aprovechar más eficientemente la energía térmica disponible en el vapor se ha desarrollado la turbina de varios pasos de velocidad, en la que después de pasar el vapor por la primera hilera de álabes móviles, se le hace pasar por una segunda y aún por una tercera hilera de álabes móviles. De esta manera casi se disipa toda la velocidad del vapor. La redirección del vapor puede hacerse de diferentes maneras. Se pueden usar álabes guías estacionarios como se muestra en la Fig. 16-8 o toberas de reentrada (Fig. 16-9) o pasos de flujo helicoidal (Fig. 16-10). Este último diseño utiliza una rueda especialmente construida con álabes semicirculares intercalados en el anillo de la rueda. El vapor se expande en la tobera y entra en los álabes semicirculares, hace un giro completo de 180° dentro del álabe, dirigiéndose después a una cámara de donde pasa después a los álabes subsecuentes.

Turbinas de reacción

En realidad no se fabrica una verdadera turbina de reacción. De hecho no es deliberada la insistencia en producir una definición rígida de las turbinas de impulso y de reacción, ya que los últimos pasos de la turbina de impulso de expansión múltiple producen aumentos pequeños de reacción. Propiamente, a la turbina de reacción debiera llamársele turbina de impulso-reacción.

La turbina "de reacción" se construye de varias hileras de álabes móviles fijos a la rueda o rotor, y de un número igual de álabes fijos en la cubierta. Los álabes fijos experimentan una caída de presión y, por lo tanto, un aumento de energía cinética o de velocidad. Al entrar el vapor a los álabes móviles se produce un impulso justamente igual que en las turbinas de impulso. Sin embargo, estos álabes móviles están diseñados de tal manera que la caída de presión, que también se tiene por el paso del vapor a través de los mismos, produce una reacción. Por lo tanto, es accionada por una combinación de fuerzas reactivas e impulsivas.

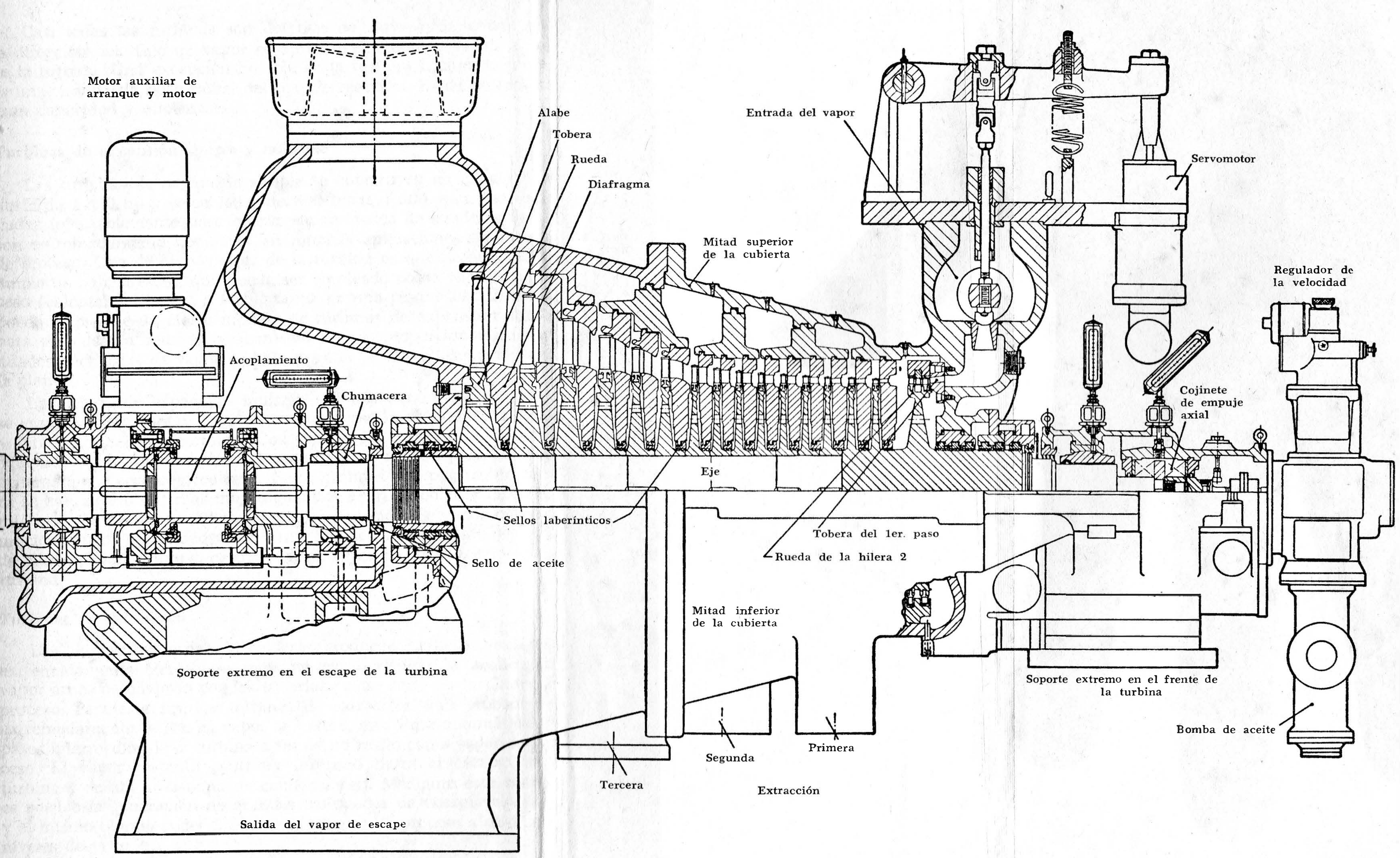


FIG. 16-11. Turbina de vapor de expansión múltiple (cortesía de DeLaval Steam Turbine Company).

Casi todas las turbinas son del tipo de flujo axial, o sea que la dirección del flujo de vapor es aproximadamente paralela al eje de la turbina. Una excepción notable es la turbina Ljungstrom, que es una turbina de flujo radial del tipo de reacción. Es de notarse su gran capacidad y eficiencia.

Turbinas de expansión simple y múltiple*

Las turbinas de expansión simple se construyen en capacidades hasta de 1 500 hp y velocidades de 600 hasta 7 000 rpm. Son diseñadas invariablemente para operar sin unidades de condensación y son extremadamente populares en muchas aplicaciones en plantas de proceso. Una de las ventajas de la turbina es que produce vapor limpio de baja presión, que puede ser empleado como vapor de proceso (calentamiento, etc.). Por lo tanto, en una planta bien diseñada puede emplearse un cierto número de turbinas de expansión simple para propulsar a bombas, y al mismo tiempo proporcionar las cantidades necesarias de vapor de baja presión para ser usadas en toda la planta.

La turbina de expansión múltiple es más cara y generalmente se le utiliza para cargas grandes, en cuyo caso la economía de vapor es un factor muy importante. Con frecuencia estas turbinas están equipadas con unidades de condensación y se utilizan para accionar generadores o compresores centrífugos grandes. En plantas de fuerza se han ideado sistemas muy ingeniosos a fin de obtener la economía máxima del vapor utilizado en cada situación. Se puede emplear un ciclo directo de condensación o un ciclo de calentamiento del agua de alimentación, en cuyo caso se extrae vapor de varias partes de la turbina.

Turbinas de extracción

Las plantas modernas de calderas producen vapor de presiones extremadamente altas, y se hace necesario reducir la presión del vapor antes de enviarlo por las tuberías para usarlo en la planta de proceso. Para este fin, las turbinas de extracción han probado ser extremadamente útiles. El vapor se extrae, en forma automática, de pasos intermedios de la turbina a fin de utilizarlo como vapor de proceso. El vapor restante continúa fluyendo hasta el escape de la turbina y de ahí al sistema de condensación. Mediante este sistema es posible la generación de grandes cantidades de energía eléctrica, y al mismo tiempo poder proporcionar vapor de proceso a diferentes niveles de presión.

---

* Kent[6] define al paso de una turbina como "la parte de la máquina en la cual ocurre una caída de presión en el vapor, con la consiguiente generación de energía cinética, y de pasos en los que no se tiene caída de presión".

Uso de las turbinas

Las turbinas de simple expansión sin condensación constituyen el grupo más grande de turbinas usadas en procesos. Generalmente se diseñan para vapor de aproximadamente 600 lb/plg² de presión manométrica y presión de escape de 0 a 100 lb/plg² mans. Las llamadas turbinas "superpuestas" son turbinas especiales sin condensación; se les usa con vapor de presión hasta 2 000 lb/plg². Estas turbinas se han usado con ventajas, particularmente en plantas de fuerza en donde se produce vapor de alta presión. Al vapor de baja presión puede usársele en unidades de condensadores estándar de pasos múltiples. Los condensadores de las turbinas están diseñados para presión de vapor hasta 900 y en algunos casos hasta de 2 000 lb/plg² con condiciones en el escape, de vacío de 28 plg de mercurio. A estas unidades con frecuencia se les usa en plantas industriales grandes para generación de energía, y para dar movimiento a compresores y bombas muy grandes.

Características mecánicas

En la Fig. 16-11 (frente a Pág. 416) se muestra una turbina de expansión múltiple. Las cubiertas están horizontalmente divididas, con la entrada y la salida del vapor en la mitad inferior de la cubierta; esto facilita el servicio. Las cubiertas se construyen de hierro fundido para unidades de baja presión y de acero para unidades de alta presión. A menudo se les llama rueda a los ruedos que están en rotación. Estas ruedas están acuñadas al eje y deben balancearse con gran cuidado para evitar problemas de vibraciones excesivas. Por lo general, los álabes de las ruedas se construyen de acero aleado de grado alto; se usa mucho el acero inoxidable. En última instancia, la selección del material depende de la temperatura y del diseño del álabe.

El eje para casi todas las unidades estándar es de acero al carbono forjado, al que con frecuencia se metaliza alrededor del collarín del prensaestopas con una aleación de acero inoxidable, para minimizar el desgaste en dicho punto. Los diafragmas, constituidos por los álabes fijos en las turbinas de expansión múltiple, se construyen generalmente de acero inoxidable. Los diafragmas también están divididos horizontalmente al igual que las cubiertas y por las mismas razones.

El material de las toberas es variable y depende de las condiciones de operación. Se han usado latón y bronce fundido, monel y acero inoxidable.

En turbinas pequeñas se usan chumaceras autolubricadas, pero para las unidades grandes se tiene lubricación forzada. Estas chumaceras son de metal babbitt y divididas horizontalmente; pueden quitarse de la unidad sin perjuicio de la cubierta y del rotor. Aun cuando el empuje axial es pequeño en turbinas de impulso éstas

lador "hidráulico" de velocidad. Este consiste de una bomba de aceite impulsada por el eje de la turbina. Al tener cambios en la velocidad de la turbina, se producen cambios en la presión del aceite, los que pueden transmitirse al regulador de la turbina.

En turbinas pequeñas, la señal del regulador se transmite a la válvula estranguladora de vapor por medio de levas. En turbinas grandes la señal es transmitida a través de una válvula piloto pequeña. Las válvulas piloto funcionan con aceite, proveniente de una bomba de aceite, para dar movimiento a un pistón que abre o cierra la válvula estranguladora de vapor, o bien las válvulas de las toberas si se emplea el sistema de control automático de estas últimas.

Con frecuencia, en las plantas de procesos es deseable controlar la presión en la salida, o la presión diferencial, que se tiene en bombas y compresoras, en lugar de usar la velocidad angular del elemento primario. En estos casos se usa un diafragma actuado por un regulador de presión. La válvula estranguladora de vapor opera en forma automática de acuerdo a las necesidades de presión o diferencial de presión requerido, y la velocidad de la turbina será la adecuada para satisfacer dichas necesidades. Sin embargo, se incluye también un regulador estándar tipo centrífugo, de tal manera que éste puede controlar la turbina cuando el regulador de presión demanda velocidades excesivas.

Se instalan reguladores de energía en todas las turbinas. Estos reguladores consisten de un peso montado excéntricamente, que está diseñado para que la fuerza centrífuga lo haga girar hacia afuera, en caso de que la velocidad exceda en un valor de 10% arriba de lo normal. Este giro acciona un dispositivo que cierra la válvula principal de vapor y disminuye la velocidad de la turbina.

Cálculos de turbinas

Con frecuencia resulta necesario hacer estimaciones preliminares y estudios económicos de las características de una turbina, para establecer comparaciones de diferentes propuestas. Los cálculos son simples. La turbina opera en forma opuesta a los compresores y se aplican los mismos principios. Se asume el ciclo Rankine para el caso ideal y se aplica una eficiencia total para corregir las condiciones teóricas. El vapor se expande isoentrópicamente (entropía constante) desde las condiciones iniciales hasta las condiciones finales. La diferencia de entalpía representa el trabajo hecho por libra de vapor, ya que realmente se dispone del diagrama de Mollier para el vapor de agua; este diagrama es utilizado en los cálculos, que se realizan con bastante rapidez.

$$\text{Trabajo} = H_2 - H_1 \text{ Btu/lb de vapor} \qquad (1)$$

donde H_2 = entalpía del vapor de entrada

H_1 = entalpía del vapor de salida

$$\text{o} \qquad \frac{H_2 - H_1}{2\,544}, \qquad \frac{\text{hp-hr}}{\text{lb de vapor}} \tag{2}$$

Al recíproco de la ecuación 2 se le llama consumo teórico de vapor por caballo hora o consumo teórico de agua por caballo hora; sus unidades son lb de vapor por hp-hr. El consumo real puede estimarse aplicando un factor total de eficiencia.

$$\text{Consumo real de vapor} = \frac{\text{consumo teórico de vapor}}{\text{eficiencia de la turbina}} \tag{3}$$

En las Figs. 16-12 y 16-13 se tienen valores de eficiencias para fines de estimación. Estas curvas representan eficiencias típicas a plena carga y presentan un factor de corrección para obtener la eficiencia correspondiente a media carga.

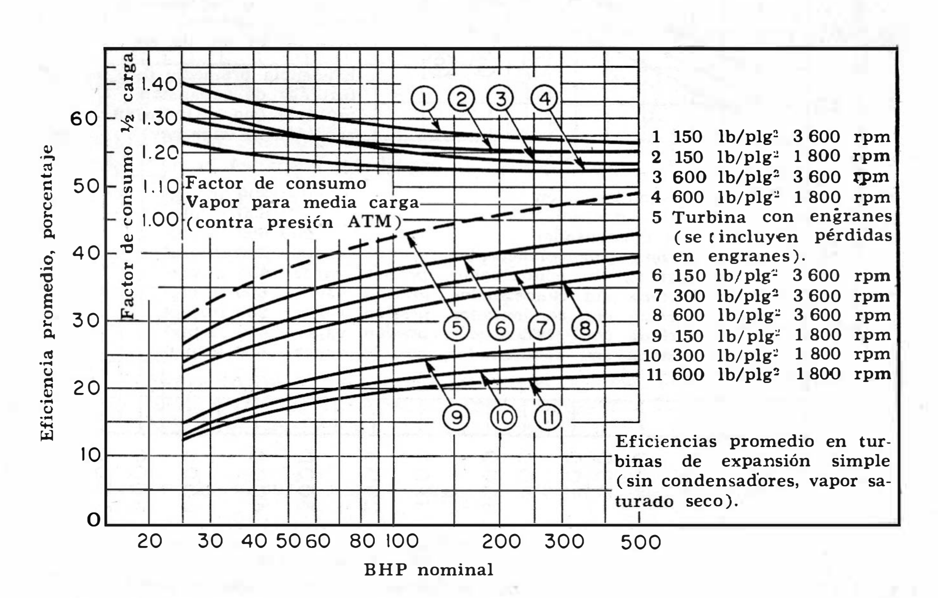


FIG. 16-12. Eficiencias promedio de turbinas de expansión simple. [Adaptadas con permiso de *DeLaval Engineering Handbook* (1947). DeLaval Steam Turbine Company.]

Se ha observado que las turbinas controladas por estrangulamiento del vapor exhiben una relación lineal entre el consumo de vapor en lb por hr (no unidades de lb/hp-hr) y la carga en unidades convenientes. A la línea recta se le llama línea William, y proporciona un método simple para estimar el consumo de vapor para cualquier carga de la turbina cuando se conocen solamente dos puntos de la línea.

Para las turbinas en las que la regulación se basa en el control del flujo de las toberas no se tiene línea recta, sino que se tienen

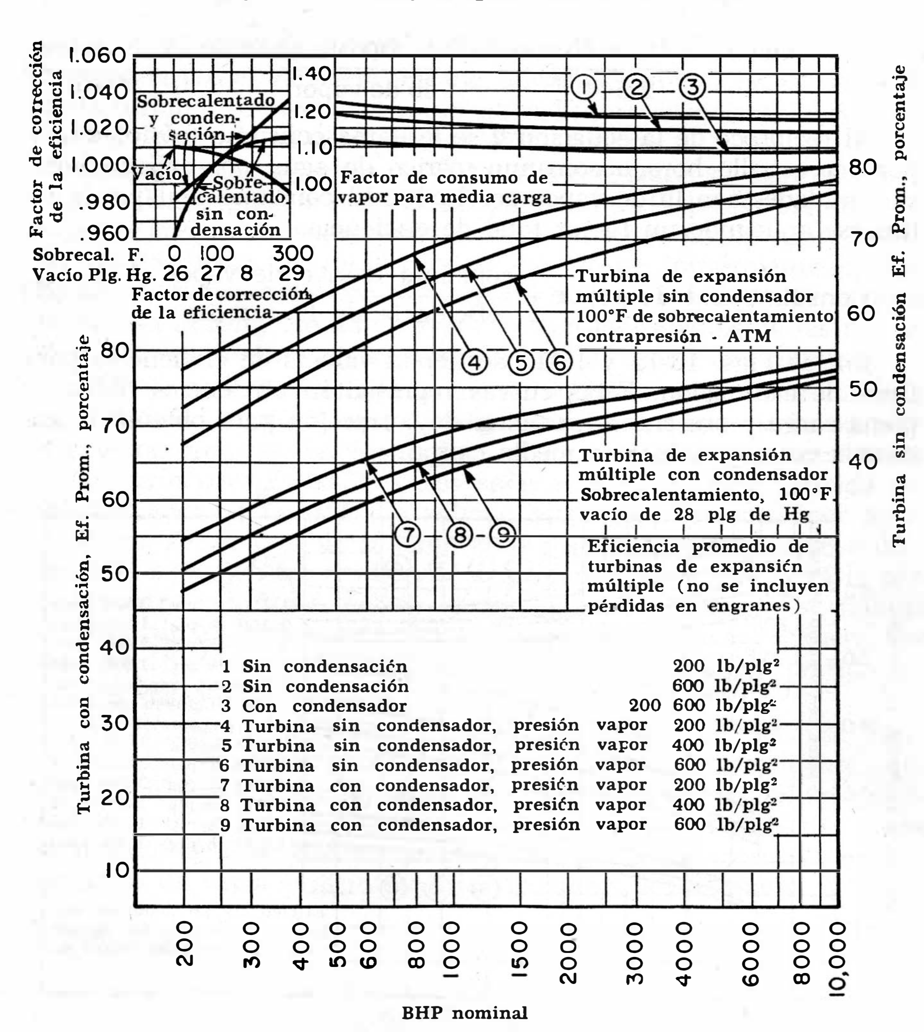


FIG. 16-13. Eficiencias promedio en turbinas de expansión múltiple. [Adaptadas con permiso de *DeLaval Engineering Handbook* (1947). DeLaval Steam Turbine Company).]

una serie de líneas William interconectadas de pendiente variable, correspondientes a cada apertura de las válvulas de las toberas. Sin embargo, para fines de estimación, una línea recta producirá valores conservativos de flujo de vapor.

Interesa mucho conocer las propiedades del vapor que se tiene en el escape de la turbina cuando va a ser usado como vapor de proceso. Estas propiedades pueden estimarse al conocerse la eficiencia de la turbina, restando a la entalpía inicial del vapor, la energía real en Btu/lb usada en la turbina como trabajo útil $[H_2 - (H_2 - H_1)$

(Eficiencia)]. Ya que se conoce la presión en el escape de la turbina, la intersección de la línea de presión constante, correspondiente con la entalpía final calculada, proporcionará la temperatura del vapor y, por lo tanto, se tendrán sus características completas.

Se pueden usar métodos similares para analizar turbinas más complicadas; por ejemplo, las turbinas de extracción exhiben una serie de líneas William correspondientes a los diferentes valores de los flujos constantes de extracción, los que son obtenidos agregando el flujo de extracción a la línea original sin extracción. Con la ayuda del diagrama de Mollier pueden hacerse los balances de calor en las turbinas que emplean ciclos regenerativos para calentamiento del agua de alimentación, o para otras técnicas similares.

EJEMPLO DE CÁLCULO: Una turbina de expansión simple de 350 hp, 1 800 rpm y sin condensador, recibe vapor de 385 lb/plg² manométricas y 520°F, y la presión en el escape es de 60 lb/plg² manométricas.

a. Preparar una gráfica que muestre el consumo de vapor para cualquier carga.

b. Determinar las características del vapor en el escape.

Entalpía en la entrada H_2	= 1 256
Entalpía en el escape (del diagrama de Mollier)	= 1 115
Energía total	141 Btu/lb

De la Fig. 16-12 la eficiencia para carga completa es 22%.

$$\text{Consumo real de vapor} = \frac{2\,544}{(141)\,(0.22)} = 82 \text{ lb/hp-hr}$$

(*a*) Consumo de vapor para carga completa = (82) (350) = 28 700 lb/hr
De la Fig. 16-12 el factor para media carga es aprox. 1.17
∴ Consumo para media carga = (82) (1.17) = 96 lb/hp-hr.

$$\text{Consumo de vapor a media carga} = (96)\left(\frac{350}{2}\right) = 16\,800 \text{ lb/hr}$$

Con estos dos puntos se puede trazar la curva característica o línea William. Véase la Fig. 16-14.

(*b*) Entalpía final estimada = $H_2 - (H_2 - H_1)$ (Eficiencia)

$$1256 - (141)\ (0.22) = 1225 \text{ Btu/lb}$$

En el diagrama de Mollier la intersección de la línea de entalpía de 1225 con la presión manométrica en el escape de valor 60 lb/plg² corresponde a una temperatura de 390°F, o aproximadamente a un sobrecalentamiento de 80°F.

TURBINAS DE GAS

La turbina de gas produce trabajo útil obtenido a partir de la expansión de gases calientes, procedentes de la combustión de un combustible y de aire comprimido (véase Fig. 16-15). Una parte

de la energía producida por la turbina se usa para comprimir el aire necesario en el ciclo de combustión.

El primer uso que se les dio a las turbinas de gas en los procesos industriales, fue la propulsión de compresoras de aire para el suministro de aire de regeneración a las unidades Houdry de desintegración catalítica de cama fija. Se hicieron expandir en la turbina de gas los productos calientes de la combustión del ciclo de regeneración del catalizador. Se utilizaba la energía secundaria de la turbina para generación de energía eléctrica, conectando para ello un generador pequeño al eje de la turbina. Sin embargo, declinó el uso de estas unidades de cama fija y gradualmente desapareció la turbina de gas

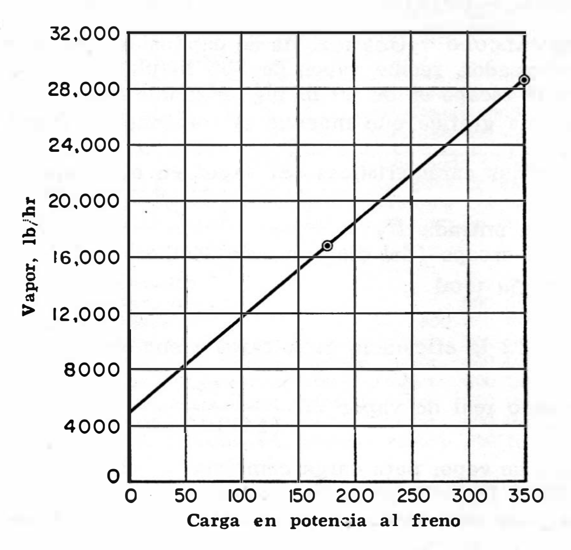


FIG. 16-14. Trazo de la línea William.

de las plantas de proceso. Como lo describe Miller,[10] el proceso Houdry era único en su adaptabilidad a la turbina de gas, debido a que la temperatura de regeneración y por lo tanto, la temperatura del gas que llegaba a la turbina tenía que ser mantenida por sistemas auxiliares de enfriamiento a menos de 1100°F, para prevenir la desactivización del catalizador. No fue difícil encontrar los materiales adecuados a las temperaturas que se tienen en las turbinas de gas. Sin embargo, para las turbinas de gas ordinarias, las temperaturas de combustión son altas y los gases tienen que sufrir algún enfriamiento antes de entrar a la turbina. Debido a que se dispone de aleaciones resistentes a temperaturas elevadas, no se requiere de mucho enfriamiento y se ha simplificado el diseño de la turbina de gas. Por lo mismo las turbinas de gas nuevamente son utilizadas en las plantas de proceso en aquellos lugares donde resultan de uso más económico, comparado con los motores y las turbinas de vapor.

En la Fig. 16-15 se muestra el ciclo de una turbina simple de gas. Esta consiste de una turbina de múltiple expansión, asociada con la cámara de combustión del combustible gaseoso, de un compresor centrífugo y de un generador eléctrico. Se suministra aire comprimido al sistema de combustión y los gases calientes de la combustión son enfriados al diluirlos con aire; esto antes de su entrada a la turbina. Al igual que en las turbinas de vapor, los gases expandidos producen la rotación del eje de la turbina, a la que están acoplados el compresor y el generador. Se pueden usar en forma separada reductores de velocidad en cada uno de los ejes de la turbina, de tal manera que tanto el compresor como el generador trabajen a eficiencia máxima.

La turbina de vapor ha demostrado ser más económica usándola para generación de energía eléctrica y utilizando su vapor para procesos; también para dar movimiento a compresores centrífugos. El vapor que se utiliza en el proceso se extrae de una parte del ciclo. De manera similar, la turbina de gas puede trabajar más económicamente usándola como generadora de energía eléctrica y para su-

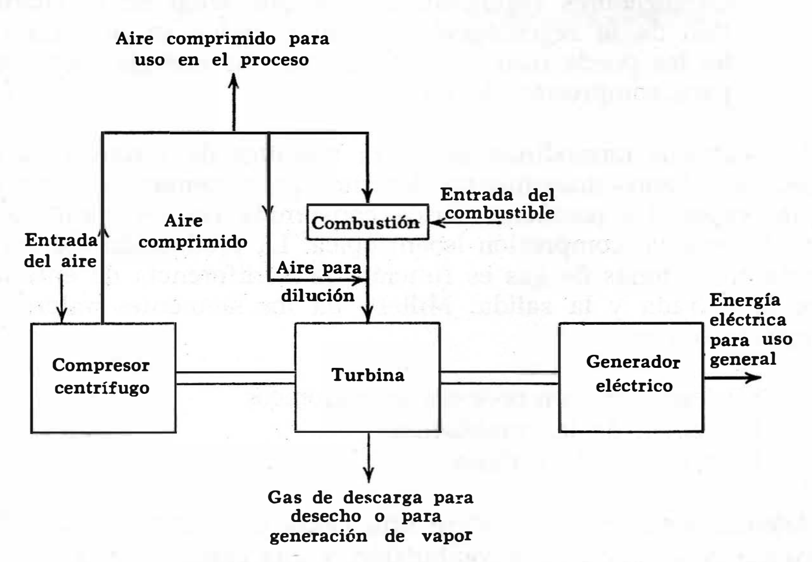


FIG 61-15. Ciclo de una turbina simple de gas.

ministro de aire comprimido para un proceso. Sin embargo, debe considerarse el uso de la turbina de gas en aquellos lugares en los que se puede conseguir barato el combustible gaseoso tal como el gas natural, productos de gas o gases de desperdicio como los productos de un proceso de combustión. Algunas de las aplicaciones típicas son:

1. Compresión de gas natural.
   a. Como compresor para elevar la presión en las tuberías.

b. Reinyección de gas natural en formaciones de petróleo.

2. Suministro de cantidades grandes para procesos.
   a. Síntesis amoniacal; aire para la producción de gas sintético.
   b. Fabricación de ácido nítrico; aire para oxidación del amoniaco.
   c. Producción de oxígeno y nitrógeno en gran escala.
   d. Regeneración de catalizadores; aire para encendido del coque para catalizadores (de interés cuando la regeneración es a baja presión).
3. Utilización de los gases de desperdicio para producción de energía eléctrica y de aire comprimido.
   a. Fabricación de ácido nítrico; los gases de desperdicio del ácido de la columna de absorción a 80 lb/plg^2 man, son calentados hasta 900°F, usando intercambiadores de calor con los productos de la reacción del convertidor y después expandidos en la turbina de gas. Se comprime aire para el proceso y se genera energía eléctrica usando la energía de los gases recobrados.
   b. Catalizadores regenerativos; los productos de la combustión de la regeneración son expandidos en una turbina. Se les puede usar para generación de energía eléctrica y para compresión de aire.

Los cálculos termodinámicos para sistemas de turbinas de gas siguen los mismos lineamientos descritos para compresores y turbinas de vapor. La potencia teórica consumida en los compresores puede basarse en compresión isoentrópica. La producción teórica de energía en turbinas de gas es función de la diferencia de entalpías entre la entrada y la salida. Miller[10] da los siguientes valores de eficiencias típicas:

Eficiencia de compresores isoentrópicos	85%
Eficiencia de la combustión	98
Eficiencia de la turbina	85 a 90

Además sugiere se considere una caída de presión de 2 a 5% en los pasos de mezclado y combustión, y una caída de entalpía de 1 a 3%, pérdida debida a la operación de los auxiliares de la turbina.

Se han desarrollado ciclos muy ingeniosos para aumentar el valor de las eficiencias térmicas. Estos incluyen la generación de vapor usando los gases de descarga de la turbina y la introducción de este vapor dentro de los gases que entran al sistema de combustión. No es difícil efectuar los cálculos de energía, ya que pueden hacerse balances de energía en cada una de las partes del sistema. Sin embargo, deben hacerse pruebas para proporcionar datos de pérdidas térmicas y eficiencias.

REFERENCIAS

1. Abbott, A. L., *National Electric Code Handbook*, 7a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.

2. Church, A. H., y H. Gartman, *DeLaval Engineering Handbook*, DeLaval Steam Turbine Co., Trenton, N. J., 1947.

3. Drinkle, L. R., F. Hodik, y E. T. Grost, *Alternating Current Motors*, American Technical Society, Chicago, 1948.

4. Gray, A. y G. A. Wallace, *Principles and Practice of Electrical Engineering*, 6a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1947.

5. Kearton, W. J., *Steam Turbine Theory and Practice*, 5a. Ed., Pitman Publishing Co., New York, 1948.

6. Kent, W., *Kent's Mechanical Engineers' Handbook*, Vol. II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.

7. Kropf, V. J., *Chem. Eng.*, No. 7, 123 (1951).

8. Miller, B., *Chem. Eng.*, 62, No. 1, 175; No. 2, 187 (1955).

9. *NEMA Standards for Motors and Generators*, National Electrical Manufacturers Association, New York, 1949.

10. Neman, L. E., A. Keller, J. M. Lyons y L. B. Wales, *Modern Turbines*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1944.

11. Shoults, D. R., C. J. Rife y T. C. Johnson, *Electric Motors in Industry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1942.

12. Willis, C. H. y H. M. Chandler, Jr., *Introductory Electrical Engineering*, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, 1952.

CAPITULO 17

OTROS EQUIPOS PARA PROCESO

En los capítulos anteriores a esta sección, se discutieron todos los equipos que son de uso común en las plantas de proceso. Además se tienen otros equipos importantes para ciertos procesos que el ingeniero de proyecto debe ayudar a seleccionar.

Con el fin de efectuar selecciones adecuadas del equipo, el ingeniero de proyecto debe estar familiarizado con la teoría y con los metódos empíricos usados en el diseño, además con la clase de información solicitada por el fabricante antes que se produzcan las correspondientes recomendaciones. En este capítulo se.discuten brevemente algunos de los tipos de equipos usados en las plantas de proceso, y se dan referencias para hacer estudios más completos. Se proporciona una lista de la información solicitada por el vendedor para cada uno de los equipos considerados en este capítulo.

AUTOCLAVES

El dimensionado de los reactores químicos es un trabajo específico del ingeniero de proceso. Para la determinación del tamaño, estilo y forma de un reactor químico, se consideran los datos de la cinética química juntamente con los datos obtenidos en las pruebas efectuadas en las plantas piloto. Por lo mismo, los reactores se construyen de manera muy especial.

Hay ciertos procesos que es preferible manejarlos en autoclave, especialmente aquellos que requieren de operaciones intermitentes, tales como algunas operaciones de polimerización. La demanda de autoclaves con agitadores y superficies de calor adjunto, ha influido en varios fabricantes de equipo para producir líneas completas de

estos equipos en varios tamaños estándar, que se pueden adquirir de inmediato. Resulta muy económico adaptar las necesidades a los tamaños estándar de las autoclaves. El ingeniero de proceso debe fijar la capacidad de la autoclave ya que el fabricante de la misma no está familiarizado con la reacción, y con frecuencia es preferible evitar el dar información referente a la reacción correspondiente.

El fabricante de la autoclave puede y debe hacer algunas preguntas para la fabricación del área de transferencia de calor, agitador y algunos otros accesorios mecánicos. Por la experiencia que tiene el fabricante, él es el más indicado para resolver problemas referentes a empaques cuando se tienen altas presiones; también es el más indicado para el cálculo del espesor de la pared del recipiente a presión y métodos de fabricación con materiales de aleación. Las autoclaves pueden ser calentadas con agua caliente, vapor, fuego directo, aceite caliente, "Dowtherm" y por calentamiento eléctrico. Cada uno de estos sistemas, especialmente el de fuego directo, Dowtherm y el de calentamiento eléctrico, requieren de considerables conocimientos, que los fabricantes de autoclaves han adquirido a través de muchos años de experencia.

Al fabricante debe dársele la información necesaria para la selección y diseño del sistema de agitación, del sistema para transferencia de calor y del recipiente. Los fabricantes están enterados de los secretos de algunos procesos, por lo que será conveniente describirles la reacción en términos de algún fluido que sea similar. Las propiedades físicas del mismo deben ser razonablemente exactas.

A medida que se vayan mejorando, las técnicas de cinética aplicada harán posible la ejecución continua de muchas reacciones en reactores* colocados a lo largo de tuberías, las cuales tradicionalmente se han efectuado en autoclaves como reacciones intermitentes.

Información requerida por el vendedor

1. Propiedades físicas y químicas.

   a. Densidad de la mezcla de reacción a las condiciones de operación.
   b. Viscosidad de la mezcla de reacción a las condiciones de operación.
   c. Toxicidad e inflamabilidad de la mezcla de reacción.
   d. Algunos otros factores o descripción del material (o materiales similares) que sea posible proporcionar.
   e. Si se va a usar una autoclave para diferentes reacciones, proporcionar el intervalo de las propiedades físicas.

2. Condiciones de operación.

   a. Presión máxima en el interior de la autoclave.
   b. Temperatura máxima (dar el ciclo tiempo-temperatura o límites aproximados). Es necesario dar una idea de la velocidad a que aumente la temperatura para diseñar la presión adecuada en el recipiente.

* Se instalan orificios en la tubería para producir la mezcla necesaria.

c. Tipo preferido de calentamiento.
d. Presión de operación en las chaquetas (presión y temperatura del medio de calentamiento).
e. ¿Se necesita enfriamiento? Describir el medio de enfriamiento.
f. Describir el grado de agitación requerido. Sugerir el estilo del agitador requerido.
g. Describir los sistemas de temperatura automática y control de presión.

3. Materiales de construcción: describir los materiales basándose en la experiencia que se tenga con el fluido manejado.

4. Varios.

a. Hacer una lista del tamaño, número y localización preferente de las conexiones requeridas.
b. Características de la energía eléctrica.
c. ¿Se requiere equipo a prueba de explosión?
d. Equipo auxiliar necesario.
e. Localización del equipo (describirlo).
f. Si se necesitan uniones especiales.

REFERENCIAS

1. Hougen, O. A. y K. M. Watson, *Chemical Process Principles,* Vol. III, John Wiley & Sons, New York, 1947. (Teoría cinética aplicada.)
2. Eldridge y Piret, *Chem. Eng. Prog.* 46, 290 (1950). [Reactores con tanques de agitación en serie (cálculos).]

CENTRIFUGAS

Hay dos tipos principales de centrífugas. Uno de ellos llamado centrífuga y el otro, filtro centrífugo. La separación por efectos centrífugos causa que un líquido o un sólido puedan moverse a través de una fase líquida continua, bajo la influencia de una fuerza centrífuga. En el filtro centrífugo la fase sólida es soportada por un medio filtrante (por ejemplo pantalla perforada), y la fuerza centrífuga obliga al líquido a pasar a través de la capa sólida. El primero es similar a tener sedimentación gravitacional y puede aplicarse al mismo la ley de Stockes, mientras que el segundo es similar a la filtración y la resistencia de la costra del lodo juega un papel muy importante.

Para la máquina del tipo de sedimentación (centrífuga) puede demostrarse que $Q = 2v_g\Sigma$, donde Q es la velocidad de flujo del líquido, y v_g la velocidad de las partículas de sedimentación, y Σ es una constante que depende del tipo y tamaño de la máquina. Ambler[1] establece que las características de dos centrífugas de diferente tamaño, operando en el mismo sistema, son similares cuando $v_{g1} = v_{g2}$. Por lo tanto, $Q_1/\Sigma_1 = Q_2/\Sigma_2$, y esta relación proporciona un medio para comparar unidades a escala pequeña con unidades grandes.

Sin embargo, las correlaciones no han sido completamente satisfactorias aun cuando se han tenido progresos en este campo.

El principal logro obtenido ha sido la predicción de las características de la centrífuga de taza a partir de datos de laboratorio. Sin embargo, se han obtenido algunos resultados favorables con otros estilos, específicamente cuando la unidad pequeña es operada a velocidad tal que produce aproximadamente la misma fuerza centrífuga que la producida en la unidad mayor.

La teoría para filtrado centrífugo está menos desarrollada que la de la centrífuga y es necesario hacer pruebas en unidades más grandes, a menos que el material a filtrar sea exactamente el mismo con respecto al de algunas unidades que trabajan satisfactoriamente.

Aun cuando no son seguros los valores obtenidos por extrapolación en las pruebas efectuadas en unidades de pequeña escala, estos resultados podrán ayudar a indicar la naturaleza del problema y a planear las pruebas subsecuentes con equipo más grande.

En base de las discusiones anteriores, se deduce que es esencial proporcionarle al fabricante de la centrífuga una muestra del material que va a ser procesado. Es adecuado proporcionarle una muestra de aproximadamente cinco galones de volumen, a fin de que haga los trabajos preliminares en escala pequeña. Es probable que después necesite de muestras más grandes, o bien de efectuar pruebas a escala mayor en el sitio de la planta.

Información requerida por el vendedor

1. Datos físicos.

   a. Análisis completo del material centrifugado.
      1. Peso en porcentaje de sólidos y líquidos.
      2. Composición química de cada constituyente.
      3. Variaciones posibles en su composición y cantidades relativas.

   b. Densidad y viscosidad a la temperatura de operación de los componentes líquidos.
   c. Densidad y viscosidad a la temperatura de operación del material centrifugado.
   d. Temperatura de operación (con frecuencia es deseable la máxima posible porque a temperaturas mayores corresponden viscosidades menores).
   e. Densidad de sólidos.
   f. Tamaño de las partículas y distribución de los sólidos por tamaños (es deseable un análisis típico de tamizado si va a hacerse filtrado de cristales).
   g. Fragilidad y forma de las partículas.
   h. Velocidades de sedimentación por gravedad, si se tiene el dato, y abrasividad de los sólidos.

2. Condiciones de operación.

   a. Objeto de la operación: clasificación, separación, deshidratación y lavado de cristales, etc.
   b. Disposición de los componentes y calidad de cada fase (contenido de humedad en cristales, pureza de líquidos, etc.).

c. Capacidad (cantidades por hora y por día).
d. Si va a tenerse separación de cristales mediante lavado, sugiera el líquido para el lavado, necesario para efectuar la separación del líquido madre y la pureza deseada de los cristales.
e. Es muy útil conocer la operación de la centrífuga con respecto al proceso completo.

3. Materiales de construcción.

Las centrífugas se construyen de ciertos materiales estándar indicados en los catálogos de los fabricantes. Deberán de sugerirse otros materiales al haber posibles reacciones entre los materiales y el material suministrado a la centrífuga, o con los componentes del material suministrado.

4. Varios.

a. Disponibilidad de superficie en pisos.
b. Característica de la energía eléctrica y tipo de motor requerido (a prueba de explosión).
c. Si hay necesidad de construir hermética la centrífuga, porque los materiales sean tóxicos o inflamables.

REFERENCIAS

1. Ambler, Charles M., *Chem Eng. Progr.*, *48*, 150 (1952). (Evaluación de las características de las centrífugas y descripción del equipo de un fabricante).
2. Ambler, Charles M., New Jersey Section Meeting, Am. Inst. Chem. Engrs., mayo 5, 1953. (Técnicas amplias de evaluación.)
3. Perry, J. H. *Chemical Engineers Handbook*, 3a. Ed. 992-1013, McGraw-Hill Book Co., Nueva York 1950. (Descripción de equipo.)
4. Smith, J. C., *Ind. Eng. Chem.* *39*, 474 (1947), (Técnicas para selección de centrífugas y descripción de equipo.)

TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las características de las torres de enfriamiento se basan en la transferencia simultánea de calor por difusión y convección. Merkel, en 1925, expresó matemáticamente este hecho usando los principios de transferencia de masa y calor. Se han presentado muchas variaciones de su expresión original. Una expresión típica de la ecuación de una torre de flujo encontrado puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z = \frac{C_p L}{K_x a} \int \frac{dt}{H^* - H}$$

donde Z = altura de la torre en pies.
C_p = capacidad de calor del agua.
L = velocidad del agua lb/(hr) (pie cuadrado de sección transversal de la torre).
a = superficie de agua por unidad de volumen de la torre pies^2/pies^3.

t = temperatura del agua, °F.
H^* = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua, Btu/lb de aire seco.
H = entalpía de la masa principal de aire, Btu/lb de aire seco.
K_x = coeficiente total de transferencia de calor cuyas unidades son lb de aire seco/(hr) (pie² de superficie de agua).

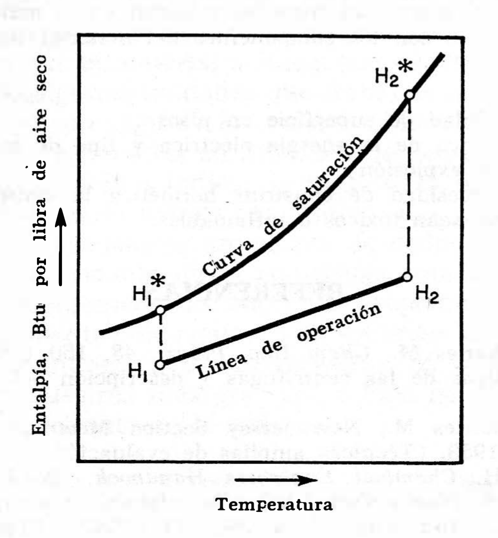


FIG. 17-1. Integración gráfica de $dt/H^* - H$.

Debido a que ordinariamente es imposible determinar por separado el valor de a, la combinación K_xa se determina experimentalmente midiendo las características de la torre de enfriamiento. El término K_xa contiene a todos los factores empíricos de diseño. Los fabricantes de torres de enfriamiento han determinado estos valores de K_xa en las torres de enfriamiento que ellos fabrican, y sus resultados son dignos de toda confianza.

La integración que se muestra en la ecuación anterior puede resolverse ya sea gráfica o numéricamente, cuando se dispone de la gráfica de entalpía húmeda contra temperatura. Como se muestra en la Fig. 17-1, por abajo de esta curva se traza una línea recta basada en los valores de las entalpías de entrada y salida H_1 y H_2. De esta gráfica podrán determinarse los valores de $H^* - H$ correspondientes a las condiciones del problema y podrá con esto resolverse la integración.

Este procedimiento permite la determinación de K_xa para una torre de características conocidas, o la estimación de las características de la torre al variar ciertas condiciones, o también calcular la

altura de la torre para un valor supuesto de $K_x a$. El término $H^* - H$ es fundamental en la selección de la torre; al acercarse la línea de operación a la curva de saturación se aumenta la humedad del aire y se requiere de torre de enfriamiento de mayor tamaño para un servicio dado.

El uso de esta simple y valiosa ecuación depende de la exactitud que se tenga en la predicción de los valores de diseño $K_x a$. Solamente los fabricantes de torres de enfriamiento y quizá ciertas compañías que disponen de muchos datos de fabricantes de torres, tienen equipo para hacer este tipo de predicciones. Por lo tanto, al fabricante debe proporcionársele todos los datos pertinentes para que haga el diseño más adecuado a las condiciones de operación. Debido al gran tamaño de las torres de enfriamiento, su instalación debe dársele a otra compañía a manera de subcontrato, detallando por escrito las especificaciones respecto a la calidad de los materiales y a la mano de obra, junto con las condiciones de operación.

Información requerida por el vendedor

1. Tipo de torre de enfriamiento.

La torre de tipo inducido es la más comúnmente usada, debido a que en ella es menor la tendencia a la recirculación del aire descargado. Sin embargo, la de tiro forzado es más apropiada para manejo de aguas altamente corrosivas, debido a que ni el ventilador ni las partes en movimiento están en contacto con el vapor saturado, como ocurre en la torre de tiro inducido. Se usan otros tipos para aplicaciones especiales (véanse referencias).

2. Condiciones de operación.

a. Capacidad, gpm de agua.
b. Temperatura del agua a la entrada.
c. Temperatura deseada del agua a la salida.
d. Selección de la temperatura del bulbo húmedo del aire ambiente. La selección de la temperatura del bulbo húmedo se fija en base económica y no será necesariamente el valor máximo registrado en la localidad. Una base común es la llamada 5% del bulbo húmedo. Esta temperatura del bulbo húmedo no excederá en más del 5% a la tenida en el transcurso de tiempo entre los meses de junio y septiembre.
e. Tiempo anual de evaporación (horas).
f. Debe especificarse el nivel del ruido en los ventiladores.
g. Las pruebas de aceptación deben especificarse de acuerdo al procedimiento de las últimas pruebas de torre de enfriamiento de la ASME Power Test Code para equipos de enfriamiento de agua atmosférica.

3. Materiales de construcción.

Tipo de madera, relleno, herrajes, conexiones de tuberías, estanque, ventiladores y motores. Estos detalles pueden especificarse juntamente con el fabricante, pero deberán indicarse en las especificaciones. Por ejemplo, el término pino de California no es completamente descriptivo. El pino de California

es clasificado de acuerdo a la California Redwood Association; debe especificarse el grado correspondiente.*

4. Varios.

a. Limitaciones de espacio.
b. Datos de los vientos prevalecientes.
c. Un croquis del espacio destinado a la torre de enfriamiento indicando el tamaño del equipo de los alrededores.
d. Localización de torres de enfriamiento cercanas.
e. Altura sobre el nivel del mar.

REFERENCIAS

1. Baker, D. R. y L. T. Hart, *Petroleum Refinery, 31* Núm. 10, 97-103 (1953). (Teoría.)
2. Degler, H. E., *Petroleum Engr., 22,* Núm. 3, Pág. C-29; Núm. 4, Págs. C-15 y Núm. 5, Pág. C-25 (1950). (Descriptivo.)
3. Kern, D. W., *Process Heat Transfer.* Págs. 563-609, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950. (Teoría, cálculos y descripción de equipo.)
4. Perry, J. H., *Chemical Engineer's Handbook,* 3a. Ed. 789-797, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950. (Gráficas para estimar el tamaño de torres de enfriamiento y potencia para ventiladores.)

TRITURADORAS Y MOLEDORAS

Se ha considerado que la clasificación del equipo es el primer paso en el estudio sistemático y entendimiento de cualquier proceso. Sin embargo, con frecuencia la clasificación de equipo no es un problema sencillo, como ocurre en el caso de trituradoras y moledoras. Por muchos años se clasificó al equipo de moledoras de acuerdo con el tipo del producto. Pero, por ejemplo, los molinos a martillo pueden aplicarse satisfactoriamente a la producción de todos los tipos de productos, desde gruesos y finos hasta superfinos. El ingeniero de proyecto necesita conocer la descripción de cada tipo de molienda corrientemente fabricado, incluyendo información referente a su campo de aplicación y el conocimiento de las ventajas y desventajas. Esta información es de más utilidad que algunos intentos tediosos de clasificación de equipo.

Se tiene bastante empirismo en el campo de las trituradoras y moledoras. Rittinger y Kick han elaborado ecuaciones teóricas para calcular las necesidades de potencia, las cuales son menos exactas que las relaciones semiempíricas elaboradas recientemente por Bond y Wang.[2] Aun cuando se han hecho bastantes esfuerzos en el desarrollo de la teoría básica para equipo de molienda, la selección final de una trituradora y moledora para un material dado, depende de las pruebas efectuadas en la planta o a partir de los datos de operación obtenidos de materiales similares.

*El llamado pino de corazón de California ("heart" redwood) es excelente para la construcción de torres de enfriamiento.

No es de esperarse que una compañía dé recomendaciones imparciales del tipo de equipo necesitado, ya que no se tienen compañías que fabriquen todos los tipos de trituradoras y moledoras. Por lo mismo, será necesario que el ingeniero químico haga una selección preliminar de varios tipos de máquinas de molienda antes de solicitar detalles a los fabricantes. Los fabricantes de equipo deberán permitir efectuar varias pruebas con el material a triturar, para determinar las condiciones de operación más favorables para un determinado tipo de molienda. Smith[6] preparó un reporte que ayuda mucho al ingeniero a hacer las selecciones preliminares.

Antes de proceder a la selección preliminar del equipo, debe conocerse el tamaño de las partículas de alimentación y del producto, y algunas otras propiedades físicas de este último. Toda esta información y la que se indica más abajo, debe proporcionarse al fabricante para auxiliarlo en la selección de la unidad. También debe enviársele al fabricante las muestras del material a procesar. Para las unidades planta piloto se requieren muestras de 5 a 25 libras de peso. Si las pruebas se hacen a escala mayor, se aconseja hacer envíos de 100 libras de peso como mínimo.

Información requerida por el vendedor

1. Datos físicos.

a. Descripción del material que se va a manejar.
   1. Propiedades químicas.
   2. Similitud con otros materiales bien conocidos.
   3. Tamaño de las piezas.
   4. Higroscopía, corrosión, inflamabilidad, toxicidad, etc.

b. Densidad de bulto de la alimentación (indicar el método usado para la determinación de la densidad).

c. Densidad de bulto del producto (indicar el método usado para la determinación de la densidad).

d. Análisis de tamizado o tamaño deseado de la partícula producida (dar límites superior e inferior.)

e. Porcentaje del contenido de humedad (si hay otros líquidos en el material, nombrarlos y dar su porcentaje.)

f. Solventes para el material procesado. Sugiera el solvente más deseable para la limpieza del equipo.

g. Propiedades abrasivas.

2. Condiciones de operación.

a. Velocidad de la alimentación (mínima y máxima).

d. Temperatura de operación (máxima y mínima; indicar las temperaturas a las que el material se funde, se descompone o puede sufrir algunos cambios no deseables).

c. ¿Puede el material ser tierra húmeda?

d. ¿Se permite el secado antes de la molienda?

e. ¿Se admite calentamiento o enfriamiento en el material?

f. Tipo de clasificación deseable después de efectuada la molienda.

3. Materiales de construcción.

Sugiera los materiales para resistir la corrosión. Al proporcionar esta información, recordar que estos materiales también deben ser resistentes a la abrasión y a la erosión.

4. Varios.

a. Suministro de potencia.
b. Limitaciones de espacio.
c. Descripción del local propuesto.
d. Precauciones de seguridad si el material manejado es de peligro.

REFERENCIAS

1. Bond, F. C. *Trans, AIME, 193,* 484 (1952). (Teoría.)
2. Bond, F. C. y Jen Tung Wang., *Trans, Am. Inst. Mining Met. Engrs., 187,* 871 (1950). (Teoría y correlaciones para estimación de potencia.)
3. Erickson, Henry W., *Chem. Eng. Progr. 49,* 63 (1953) (Descripción y selección.)
4. Foote, J. Howard, *Chem. Eng. Progr., 49,* 68 (1953). (Describe técnicas de molienda que no son usuales.)
5. Piret, Edgar J., *Chem Eng., Progr., 49,* 56 (1953). (Repaso de desarrollos teóricos.)
6. Smith, Julian C., *Chem. Eng. 59,* Núm. 8, 151-166 (1952). (Descripción y sugerencias para ayudar a la selección preliminar de moledoras.)

CLASIFICADORAS

La aplicación más importante del equipo de clasificación es con respecto de equipos de molienda, y su objeto es separar el producto acabado del material que requiere más molido. Estas aplicaciones se desarrollan conjuntamente con la selección de la moledora. Los fabricantes de molinos pueden sugerir el equipo que se adapte mejor a estas unidades. En los libros de texto de minerales y secado de minerales, se da información detallada de clasificadoras.

CRISTALIZADORES

A fin de formar cristales de una solución dada, debe formarse una solución supersaturada. Esta supersaturación puede producirse por enfriamiento, evaporación del solvente o por enriquecimiento artificial de una muestra de mineral (agregándole una sustancia extraña que cause la cristalización del material) o por una combinación de estos métodos. Ayudará bastante en la selección del equipo de cristalización al conocimiento de las relaciones de solubilidad-temperatura. Una curva de solubilidad relativamente plana indica evaporación, mientras que una curva de pendiente grande (con la temperatura) indicará enfriamiento directo tipo cristalizador.

Se han aplicado datos completos de la solubilidad para casi todos los compuestos bien conocidos, y se ha hecho trabajo experimental a fin de entender mejor el mecanismo para la formación de cristales. Toda esta información ayuda mucho a producir mejoras en el diseño del equipo. Sin embargo, la operación de cristalización no consiste meramente en la formación del núcleo del cristal. Es muy común, en la cristalización industrial, el crecimiento y la formación simultánea de cristales; estos procesos se complican por las resistencias de difusión. Todos estos procesos ya han sido bien estudiados, pero no se tienen cálculos exactos de la velocidad de formación.

La carencia de datos seguros hace necesario el tener diseños y selección de muchos cristalizadores basados en datos de pruebas efectuados en los laboratorios. En particular, estas pruebas son importantes cuando se tienen vestigios de impurezas en la formación de cristales, y el crecimiento puede afectarse grandemente por la presencia de cantidades pequeñas de impurezas.

Información requerida por el vendedor

1. Propiedades físicas y químicas.

   a. Composición química de las impurezas en el líquido alimentado.
   b. Relaciones solubilidad-temperatura.
   c. Calor de cristalización; calores específicos de la solución, de la solución madre y de los cristales (si se consigue, es deseable tener el diagrama entalpía-concentración).
   d. Densidad de las soluciones de alimentación y madre.
   e. Puntos de ebullición de las soluciones de alimentación y madre.
   f. Toxicidad e inflamabilidad.

2. Condiciones de operación.

   a. Peso de la solución de alimentación por unidad de tiempo.
   b. Peso de los cristales que van a formarse.
   c. Temperaturas de la alimentación y de la solución final deseada y cedencia de cristales.
   d. Tamaño de los cristales deseados y distribución del tamaño. (Esto puede tener algún valor realmente óptimo, o puede depender de los deseos del comprador, aunque dichos deseos sean lógicos o no.)
   e. Horas de operación diarias.
   f. Pueden especificarse requerimentos especiales para el acabado de los cristales.

3. Materiales de construcción.

   Sugerir los mejores materiales posibles al vendedor.

4. Varios.

   a. Presión y temperatura del vapor (costo aproximado).
   b. Agua de enfriamiento.
      1. Fuente.
      2. Temperatura.
      3. Costo aproximado.
   c. Otros medios de enfriamiento disponibles.
   d. Suministro de potencia.

REFERENCIAS

1. Perry J. H., *Chemical Engineer's Handbook,* 3a. Ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, (1950). (Teoría y descripción de aparatos.)
2. Thompson, A. *Chem. Eng.,* 57, Núm. 10, 125 (1950). (Descripción y selección.)

SECADORES

En años recientes se le ha puesto particular atención a los aspectos técnicos del secado, y como resultado de ello ahora se entienden mejor los fundamentos del mismo. Sin embargo, el carácter distintivo y único inherente a los diferentes tipos de secadores hace necesario que la selección y diseño final de un secador se base en pruebas efectuadas con secadores experimentales, que simulan a escala reducida al secador de la planta. Por lo tanto, es necesario enviarle al fabricante muestras del material que va a secarse. El tamaño de la muestra dependerá del tipo de secador y de la naturaleza de la prueba. Por lo general, se prefiere enviar muestras grandes.

La teoría del secado ha sido de mucha utilidad en la correlación de los datos de la prueba. El concepto de unidad de transferencia ha sido adaptado al diseño de varios tipos de secadores. Se necesita hacer pruebas en los secadores para la determinación de las velocidades de secado y de las condiciones óptimas de la operación. El fabricante de secadores es el más indicado para hacer las pruebas de secado y recomendar el diseño y tamaño más adecuado. Sin embargo, el cliente deberá hacer decisiones preliminares acerca del tipo de secador deseado.

Marshall y Friedman[2], en el manual de Perry *Chemical Engineer's Handbook* tienen elaborada una sección especial en la que tabulan la clasificación de secadores comerciales. Estas discusiones detalladas de los tipos de secadores, diseño, selección y procedimiento para efectuar las pruebas son de gran ayuda en la selección preliminar del secador. También ilustra un ejemplo para selección de un secador.

Información requerida por el vendedor

1. Propiedades físicas y químicas.
   a. Descripción del material (nombre químico, características para condiciones de húmedo y seco).
   b. Tamaño, forma y distribución de las partículas por tamaño.
   c. Densidad (de bulto y verdadera) del material húmedo, comercialmente, seco, y completamente seco.
   d. Toxicidad, inflamabilidad y naturaleza corrosiva.
   e. Contenido de humedad del material alimentado (dar las bases y el método).

f. Contenido de la humedad máxima en el producto (dar las bases y el método).
g. Si se conocen, dar los valores de las mermas y las tendencias de descomposición del material.

2. Condiciones de operación.

a. Velocidad de la alimentación.
b. Operación intermitente o continua.
c. Horas de operación por día.
d. Tratamiento del material antes y después del secado (¿se permite algún tratamiento anterior al secado, tal como la formación de material húmedo en forma de perdigones?)
e. Estimación del tiempo probable de secado.
f. Temperaturas máximas admisibles para el secado (estando húmedo y seco.)
g. Si se permite usar aire caliente, ¿cuál es la temperatura y humedad máximas?
h. Suministro de aire fresco (variación de temperatura, humedad y limpieza).
i Temperatura en el cuarto (variaciones).
j. Mecanismo para la alimentación (fabricado o comprado, describirlo).
k. Combustibles disponibles.
   1. Vapor (presión y temperatura).
   2. Gas (presión, peso específico, poder calorífico).
   3. Aceite (presión, viscosidad, poder calorífico).

3. Materiales de construcción.

Especificarlos hasta donde sea posible; hacerlo junto con el fabricante.

4. Varios.

a. Disponibilidad de espacio (describirlo o proporcionar croquis).
b. Cargas en el piso.
c. Tipo de controles automáticos e indicar quién los suministra.
d. Suministro de energía eléctrica.
e. Motores y arrancadores (tipo, e indicar quién los suministra).
f. Quien suministre los filtros de aire y otros accesorios (especifique).

REFERENCIAS

1. Friedman, S. J., *Heating and Ventilating*, 48, Núm. 2, 96-110 (1951). (Procedimiento para selección de secadores.)

2. Marshall, W. R., Jr. y M. S. Friedman, en Perry, *Chemical Engineer's Handbook*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1950. (Teoría de secado, diseño, pruebas y selección.)

EVAPORADORES

Además de los tres tipos de diseño estándar de evaporadores (circulación natural, circulación forzada y película variable) hay numerosos diseños especiales para la solución de problemas también especiales.

La complejidad de los procesos de transferencia de calor, y la variedad de diseños mecánicos, hace un tanto difícil, pero no imposible, el análisis teórico para estimación de los coeficientes de transferencia de calor por evaporación. Aunque se tienen métodos para obtener aproximadamente el valor de estos coeficientes, las experiencias previas y las pruebas efectuadas en unidades piloto construidas a escala reducida, proporcionan los medios más confiables para obtener los coeficientes de diseño. Se tiene, nuevamente, que el peso del diseño descansa en el fabricante del equipo.

Normalmente el ingeniero químico está familiarizado con los cálculos de calor y del balance del material para diseñar evaporadores de efecto múltiple. Para la solución de algunos problemas se utilizan coeficientes totales típicos de transferencia de calor, en lugar de efectuar algunos cálculos algebraicos más o menos elaborados; estos coeficientes son absolutamente necesarios, y el diseño se vería muy afectado al usar valores equivocados.

De ser posible deberá proporcionársele al fabricante suficientes muestras para hacer las pruebas de evaporación en el equipo piloto, particularmente si se tiene un problema nuevo de evaporación.

La labor del ingeniero de proyecto en lo que respecta a diseño de evaporadores, es evaluar las recomendaciones de los diferentes fabricantes para un problema específico de evaporación. Uno de los problemas básicos es interpretar todas las cotizaciones sobre la misma base. Las siguientes sugerencias pueden ser de ayuda para efecto de comparaciones.

1. Necesidades de servicio (vapor, energía eléctrica, enfriamiento, agua).
2. Tipo de evaporador, tamaño y detalles de los materiales de construcción.
3. Superficie total de transferencia de calor.
4. Capacidad y tipo de bomba.
5. Tamaño y tipo de los accesorios, materiales de construcción.
6. Código empleado para la construcción (ASME, TEMA, etc.).
7. Lista de todos los materiales suministrados por el vendedor, incluyendo tuberías e instrumentos.
8. Comparación de costos; coloque cada oferta sobre la misma base, agregando o quitando del costo total el valor estimado de los materiales necesarios, para hacer que la oferta individual sea compatible con la del diseño base escogido arbitrariamente.

Información requerida por el vendedor

1. Propiedades físicas y químicas de las sustancias diluidas y espesas.
   a. Descripción del material a evaporar (análisis químico que incluya las impurezas que contenga).
   b. Punto de ebullición.
   c. Densidades.
   d. Viscosidades (a varias temperaturas).
   e. Porcentaje de sólidos.
   f. Características de la espuma.
   g. Inflamabilidad y toxicidad.
   h. Naturaleza de los sólidos.

2. Condiciones de operación.

   a. Cantidad de sustancia diluida por unidad de tiempo.
   b. Horas de operación por día.
   c. Temperatura de la sustancia diluida.
   d. Temperatura máxima a la que puede calentarse la sustancia sin causar daño a la misma.
   e. Cantidad de sólidos a separar por unidad de tiempo, o cantidad unitaria de alimentación.

3. Materiales de construcción.

   En la evaporación de muchos materiales, determinados metales no son corroídos irregularmente, sino que contaminan el producto lo suficiente para hacer inconveniente su empleo. El fabricante debe dar tal información, en particular en lo que se refiere al hierro y al acero. Cuando sea posible, deben proporcionarse algunas sugerencias respecto a materiales apropiados.

4. Varios.

   a. Presión máxima del vapor y presión del vapor de escape disponible.
      1. Presión y temperatura.
      2. Costo aproximado.
      3. Si se tienen restricciones de su uso.
      4. Uso último del condensado del evaporador.
   b. Agua de enfriamiento.
      1. Temperatura (máxima y mínima).
      2. Fuentes y descripción.
      3. Restricciones de su uso.
   c. Suministro de potencia.
   d. Espacio disponible (trazar un plano).
   e. Preferencias por equipo especial tales como bombas, motores, equipo auxiliar y válvulas.

REFERENCIAS

1. Coates, J., *Chem. Eng. Progr.*, *54*, 25 (1949). (Estimación del área requerida, necesidades y capacidad de vapor en evaporadores de efectos múltiples.)
2. Kern, D. Q., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950. (Cálculos.)
3. Lindsey, E. E., *Chem. Eng.*, *60*, No. 4, 227 (1953). (Tipos de evaporadores, ventajas y desventajas.)
4. Storrow, J. A., *Ind. Chemist*, *24*, 311 (1948). (Cálculos.)

FILTROS

Los fabricantes de filtros tienen laboratorios muy bien equipados para estudiar los problemas de sus clientes, y para determinar datos ingenieriles para diseño. De ser posible, deben enviarse al fabricante muestras del material que va a filtrarse. Con muestras de aproximadamente 5 galones podrán hacerse estudios a escala reducida con filtros de prueba que trabajan a condiciones de vacío. Por lo general, las características de filtración obtenidas en estas pruebas, servirán para recomendar el tamaño y tipo de filtro adecuado. Algunas veces las pruebas de problema de filtrado no común, muestran la necesi-

dad de hacer estudios en plantas piloto. En estos casos se necesita tener muestras grandes para hacer pruebas en filtros pilotos a escala reducida. Resulta más conveniente que los fabricantes de filtros construyan dichos filtros de escala reducida, para proporcionárselos al cliente a una determinada renta, a fin de hacer las pruebas en el sitio donde está localizada la planta; sin embargo, la mayoría de los problemas de filtración ordinaria pueden resolverse suministrándole al vendedor los datos pertinentes descritos más adelante.

Información requerida por el vendedor

1. Datos físicos.

   a. Descripción del material a filtrar (composición química del líquido y sólido, incluyendo el valor del pH).
   b. Porcentaje de costra de lodo formada en la pasta.
   c. Densidad de sólidos.
   d. Densidad del líquido claro a diferentes temperaturas.
   e. Temperatura de la filtración.
   f. Viscosidad del filtrado y de la pasta (aproximado) a la temperatura de filtración.
   g. Descripción de los sólidos.
      1. Arenoso, granular, cristalino, viscoso, etc.; porcentaje de cada tipo.
      2. Análisis de cribado de los sólidos secos.

2. Condiciones de operación.

   a. Cantidad a filtrarse por unidad de tiempo.
   b. Tiempo de operación por día.
   c. ¿Qué porción de la pasta o mezcla va a recobrarse (filtrado, costra, o ambos)?
   d. Características de la costra si ésta va a aprovecharse.
      1. ¿Se requiere de lavado?
      2. Si necesita lavado, ¿cuál es la pureza mínima admisible?
      3. ¿Debe el líquido del lavado estar aislado de lo filtrado?
      4. Dar las tendencias de rompimiento de la costra durante el lavado y el secado.
   e. Describir los objetivos más importantes de la filtración y dar una lista de los objetivos secundarios (ejemplo: claridad máxima del filtrado).

3. Materiales de construcción.

   Debe participarse al fabricante de filtros cualquier experiencia que se tenga con metales y algunos otros materiales usados para el manejo de mezclas pastosas.

4. Varios.

   a. Presión barométrica normal.
   b. Características de la energía eléctrica, del agua del lavado y del vapor disponible en la planta.

Los filtros de aire requieren de consideraciones especiales. Es de particular importancia un análisis del tamaño de la partícula y de la distribución de los sólidos en el aire o gas que va a ser filtrado. Tal análisis requiere de técnicas muy cuidadosas, ya que el tamaño de las partículas es muy pequeño. Los filtros de aire pueden emplearse para eliminar polvos de apro-

ximadamente 0.3 micras, mientras que las partículas de dimensiones más pequeñas deben eliminarse con precipitadores electrostáticos.

Debe especificarse la pureza del aire o gas filtrado. Es muy recomendable hacer pruebas cuando esto sea posible, ya que son muchas las variables que no pueden ser predichas.

REFERENCIAS

1. Brownell, L. E. *Encyclopedia of Chemical Technology* (Editores, Kirk-Othmer), 6, 506-30. Interscience Encyclopedia Inc., New York (1951). (Descripción de equipo y teoría.)
2. Dickey, G. D., y C. L. Bryden, *Theory and Practice of Filtration,* Reinhold, New York 1946. (Equipo, aplicación y teoría.)
3. Grace, H. P., *Chem. Eng. Progr.*, 47, 502-7 (1951). (Selección de filtros, ventajas y desventajas de los diferentes tipos.)
4. Miller, S. A. *Chem. Eng. Progr.*, 47, 497-501 (1951). (Resumen de la teoría de 1946 a 1951.)
5. Miller, S. A. *Chem. Inds.*, 66, 38-48 (1950). (Descripción de filtros y lista de fabricantes.)
6. Perry, J. H., *Chemical Engineer's Handbook,* 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1950. (Resumen de ecuaciones teóricas y empíricas, equipo y diseño.)

CALENTADORES Y HORNOS

El diseño de un calentador o de un horno de craqueo, requiere conocimiento de transferencia de calor, de flujo de fluidos y de las propiedades de metales y refractarios usados para presiones y temperaturas altas. Hace algunos años, la mayoría de los hornos de fuego directo se usaban para suministrar calor a las unidades de destilación del crudo, y el diseño era empírico. Como el uso y las aplicaciones de estos calentadores ha ido en aumento, desde torres rehervidoras hasta reactores, se ha desarrollado una base teórica muy fuerte para el diseño de los mismos, especialmente en cálculos respecto a absorción de calor por radiación y convección. Por lo tanto, el diseño de un horno se ha convertido en una especialidad. Los fabricantes de hornos tienen un grupo de especialistas dedicados al diseño y construcción de hornos. Algunos hornos pequeños pueden construirse en la fábrica y embarcarse la unidad completa hasta el sitio de la planta, mientras que para unidades mayores, deben construirse en el lugar de su uso.

El ingeniero responsable de la selección de un horno debe tener conocimiento del diseño del mismo. Quizá el trabajo más útil en este campo sea el realizado por Rickerman,[3] quien presenta una descripción muy completa de los tipos de calentadores y de línea en términos muy sencillos los pasos que deben seguirse para el diseño de un horno; proporciona, además, bibliografía de mucha utilidad.

En el desarrollo de los hornos de craqueo, o de cualquier otro horno en el que se tenga una reacción química, el ingeniero de pro-

ceso debe determinar el diámetro y la longitud necesaria del tubo, así como el diámetro del mismo para producir la reacción requerida al flujo del calor especificado.

Fair y Rase,[2] basados en los principios de cinética química, muestran el método a seguir para la realización de dichos cálculos. En el diseño, el aspecto mecánico del mismo está basado en la temperatura y flujo de calor requeridos. Este trabajo incluye la selección y localización de tubos y quemadores, la selección de los materiales de construcción y el diseño estructural.

La información que el fabricante solicite, depende de las necesidades del cliente. Por ejemplo, en algunas plantas se prefieren ciertos diseños de quemadores y arreglos de cabezales. Estas preferencias deben especificarse a su debido tiempo a fin de evitar tardanzas y elevar el costo del proyecto.

No es necesario describir el combustible usado en el horno junto con los materiales, ya que se tienen datos publicados al respecto.

Información requerida por el vendedor

1. Propiedades físicas y químicas de la carga y del producto.
   - *a.* Análisis del material cargado y del producto (análisis de la destilación).
   - *b.* Densidad o grados API a 60°F (si es posible, también a otras temperaturas).
   - *c.* Viscosidad (a varias temperaturas).
   - *d.* Peso molecular de los vapores a la entrada y a la salida.
   - *e.* Características de la carga de coque.
2. Condiciones de operación.
   - *a.* Velocidad de la carga.
   - *b.* Temperatura y presión interiores.
   - *c.* Temperatura y presión exteriores.
   - *d.* Porcentaje de vaporizado a la entrada y a la salida.
   - *e.* Caída de presión máxima admisible.
   - *f.* Transferencia de calor radiante máxima admisible.
   - *g.* Capacidad del horno (Btu/hr absorbidos).
   - *h.* Velocidad mínima de flujo (si ésta es importante).
   - *i.* Combustible, descripción completa (es deseable el análisis del gas).
     1. Poder calorífico (valor inferior).
     2. Presión en el horno.
     3. Viscosidad (aceite).
     4. Densidad.
     5. Temperatura.
   - *j.* Presión del vapor en el horno.
   - *k.* Eficiencia deseada dentro del horno (dar el exceso del aire en que está basada).

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{carga útil}}{\text{Calor liberado por el combustible}} \times 100$$

3. Varios.
   - *a.* Necesidades de espacio.
   - *b.* Características especiales deseadas en el equipo mecánico deseado.
   - *c.* Datos de corrosión.

REFERENCIAS

1. Kern D. Q., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
2. Fair, J. R. y H. F. Rase, ***Chem. Eng. Progr.***, *50*, **415 (1954).**
3. **Rickerman, J. H., *Trans. Ams. Am. Soc. Mech. Engrs.*, 67, 531 (1954). Véase también la bibliografía que se tiene al final de este artículo.**

MANEJO DE MATERIALES

La escasez y el alto costo de la mano de obra durante la Segunda Guerra Mundial creó una revolución en el campo del manejo de los materiales. Se crearon varios cientos de nuevos e ingeniosos dispositivos, y la selección y aplicación adecuada del manejo de los materiales se ha vuelto cada vez más elaborada. Actualmente, en una universidad americana, se ofrece el título de ingeniería en el área del manejo de materiales. Es, por lo tanto, muy deseable que el ingeniero de proyecto solicite la ayuda de compañías que tengan personal entrenado en el área del manejo de materiales. Es conveniente que tenga un conocimiento general de todo el equipo, a fin de acelerar las discusiones que se tengan con los representantes de los fabricantes. Se obtiene mucha información de los libros de la referencia indicada más adelante.

Debe hacerse un análisis muy detallado de los esquemas de acarreo de los productos terminados, localizados en los almacenes y en los departamentos de embarque. Debe hacerse, conjuntamente con los ingenieros que intervienen en la fabricación, un diagrama del flujo el cual debe elaborarse de tal modo que se tenga el arreglo más eficiente.

Por lo general, en la literatura que proporcionan los fabricantes se tienen sugerencias para la selección de transportadores tipo estándar. El fabricante puede seleccionar algunos diseños especiales de transportador. Es deseable que la selección final, cuando se trate de un diseño estándar, sea propuesta por el fabricante ya que él conoce mejor al equipo. El cliente fácilmente puede interpretar mal las reglas impresas indicadas para la selección del equipo.

Lo que se ha especificado acerca de transportadores, también se aplica a los equipos que manejan materiales. En todos los casos el cliente debe proporcionar la información completa referente a la naturaleza del material que va a ser transportado, tales como el peso, el objetivo deseado y un diagrama que muestre los espacios libres aprovechables.

Como ilustración podrá servirle la información requerida por el vendedor del transportador.

Información requerida por los vendedores de transportadores

1. Propiedades físicas y químicas.
   a. Tamaño y distribución por tamaños (tamaño máximo de los terrones, en pulgadas).

b. Contenido de humedad.
c. Temperatura.
d. Densidad del material (real y de bulto).
e. Abrasividad, reactividad química, adhesividad, etc.
f. Capacidad del material para aguantar los efectos del transporte.
g. Naturaleza corrosiva.

2. Condiciones de operación.

a. Condiciones de temperatura y humedad en la zona donde está el transportador.
b. Velocidad máxima a la que va a ser transportado el material.
c. Longitud y localización del transportador, incluyéndose un esquema en el que se indique la trayectoria propuesta del mismo. Señálese qué equipo está adjunto.

REFERENCIAS

1. *Booklet No. 2 of Library of Knowhow*, Materials Handling Institute, Pittsburgh, Pa. (1953). (Métodos para estudio y evaluación de problemas de manejo de materiales.)
2. Mallick, R. W. y A. T. Goudreau. *Plant Layout Planning and Practice*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1950. (Incluye una sección para manejo de materiales.)
3. *Modern Materials Handling*, *8*, Núm. 6, 58 (1953). Trabajos presentados sobre aplicación de transportadores en el Conveyor Institute, Univ. of Illinois, abril, 1953.
4. *Mill and Factory*, 52, Núm. 1, 82 (1953). (Selección de sistemas de monorriel.)
5. *Pallet Pattern Selection*, Materials Handling Labs., Inc. Calle Boylston 795, Boston 16, Mass.
6. Stocker, Harry, *Materials Handling*, Prentice-Hall, Inc., New York, 1951.
7. Strube, H. L., *Chem. Eng.*, *61*, Núm. 4, 195 (1954). (Reporte sobre transportadores y elevadores, información de diseño, aplicación y selección.)

EQUIPO MEZCLADOR

Se requiere efectuar análisis en el laboratorio para hacer la selección más eficaz de tamaño y tipo del equipo mezclador para determinado servicio. Al fabricante del equipo debe dársele una descripción completa de los materiales que van a mezclarse, de tal manera que las mezclas puedan prepararse sintéticamente. Lo mejor es proporcionarle una muestra real de los materiales. La teoría de mezclado ha tenido un desenvolvimiento muy rápido en los últimos cinco años. Siguiendo los principios de similitud dimensional, pueden construirse mezcladores tamaño a escala en los que pueden hacerse pruebas dinámicas similares a las requeridas en los equipos grandes. Debe guardarse confidencia con los datos de potencia requerida, tamaño de tanques y rodetes del equipo utilizado a tamaño escala.

El procedimiento que se utiliza para mezclado de líquidos es típico. Las pruebas preliminares de mezclas se hacen en vasos pequeños de

vidrio (aproximadamente de un cuarto de galón). Después se selecciona tipo y posición de los rodetes así como la potencia necesaria para efectuar el mezclado. Es posible determinar el tamaño final del equipo a partir de la información obtenida de los mezcladores construidos a escala reducida. Para problemas más complicados, se construyen plantas piloto en donde se efectúan pruebas en tanques de mayor tamaño, que producen datos más confiables en lo que respecta a diámetro de rodetes y necesidades de potencia.

Información requerida por el vendedor

1. Datos físicos.

   a. Descripción completa y peso en porcentaje de cada uno de los componentes de la mezcla.
   b. Viscosidad y densidad de cada uno de los componentes líquidos.
   c. Viscosidad y densidad de la mezcla.
   d. Descripción de los componentes sólidos.
      1. Tamaño de partículas y distribución (análisis de tamices).
      2. Peso específico de sólidos secos y sedimentación de la lechada.
      3. Velocidad de la sedimentación.
      4. Naturaleza de los sólidos: solubilidad, insolubilidad, cristalinidad, peso, etc.
   e. Tendencia a espumeo.

2. Condiciones de operación.

   a. Propósito del mezclado: disolución de sólidos, mezcla de líquidos, dispersión de gases líquidos, suspensión de sólidos, etc.
   b. Tipo de acción requerida (violenta, intermedia o suave).
   c. Tipo de operación.
      1. Carga (dar tamaños máximos, mínimos y normales, y el tiempo disponible para el mezclado de la carga).
      2. Continua (dar velocidad de flujo).
   d. Descripción del recipiente. Proporcionar un dibujo completo del recipiente mostrando todas las dimensiones, tipo de cabezales y operación y condiciones de diseño.

3. Materiales de construcción.

   Sugiera los materiales más apropiados para aquellas partes del agitador que estarán en contacto con la mezcla. Al dar mayores posibilidades, el fabricante tendrá más oportunidades de hacer la selección más económica de los materiales a emplear.

4. Varios.

   a. Características de la energía eléctrica.
   b. Tipo de motor requerido (a prueba de goteo, blindado, a prueba de explosión).
   c. Necesidades de espacio si se tienen limitaciones.

   Se requiere cierta información especial para mezclas de sólidos y pastas como con las que trabajan los amasadores y molineros. Esta información incluye las propiedades de los materiales en cuanto a abrasividad y corte, análisis de tamices en los sólidos, cantidad de líquidos si es necesario agregar y calentamiento o enfriamiento necesario, tal como la dispersión de pigmentos, ya que esto es indicativo del tipo de mezclador y paletas que deban usarse.

REFERENCIAS

1. Boutros, R. D., *Chem. Eng. Progr.*, *48*, 211 (1952). (Instalación y mantenimiento de mezcladores.)
2. Perry, J. H., *Chemical Engineer's Handbook*, 3a. Ed. 1195-1231, McGraw-Hill Book, Co., New York, 1950. (Describa los tipos de mezcladores y dé información en tablas para diferentes trabajos de mezclado.)
3. Rushton, J. H., *Chem. Eng. Progr.*, *47*, 485 (1951). (Datos de plantas piloto y procedimientos para equipos a escala.)
4. Rushton, J. H., R. D. Boutros, y C. W. Selheimer, en *Encyclopedia of Chemical Technology.* (Editores Kirk y Othmer), Vol. 9, 133-136, Interscience Encyclopedia Ind., New York, 1952. (Descripción de equipo y aplicaciones que incluyen sólidos y pastas.)
5. Rushton, J. H. y J. Y. Oldshue, *Chem. Eng. Progr.*, *49*, 161 y 267 (1953). (Repaso, teoría y aplicaciones.)

EQUIPO DE SEDIMENTACION

Una simple prueba de decantación efectuada en el laboratorio, utilizando un cilindro graduado, indicará que la separación de cantidades grandes de líquido de una lechada podrá ser acompañada por una combinación de sedimentación y filtración. Sin embargo, para la selección adecuada del equipo de sedimentación se necesita aún más que las pruebas efectuadas en el laboratorio. Los problemas de sedimentación, aun cuando aparentemente son muy simples, pueden ser muy complicados debido a que son muchos los factores involucrados. En éstos se incluye el efecto del diseño del equipo de sedimentación y los diferentes factores físicos y químicos que afectan las características de la sedimentación que se tiene en una lechada específica.

Son aún válidas las observaciones de Coe y Clevenger efectuadas en 1916.[2] Ellos observaron diferentes zonas de la sedimentación; zona clara en la parte superior, una zona intermedia muy consistente y una zona más comprimida en el fondo. Experimentalmente se puede determinar la velocidad de sedimentación en cada una de estas zonas, y posteriormente calcular el área necesaria para cada zona.

Se puede usar la siguiente expresión para estimar las áreas necesarias y tener espesor continuo. Esta ecuación es simplemente un balance de material.

$$AR = \frac{S(F - D)}{\rho}$$

donde A = área necesaria, pies^2
R = velocidad de la sedimentación, pies/hr.
p = peso específico del líquido, lb/pie^3.
F = relación de peso líquido a sólido alimentado.
D = relación de peso líquido a sólido en la descarga.
S = peso de sólidos tratados por unidad de tiempo, lb/hr.

Coe y Clevenger[2] describen un método para estimar el volumen y, por lo tanto, la altura que se tiene en el sedimento formado en un cilindro graduado. El volumen puede estimarse de acuerdo al tiempo de retención necesario para producir el flujo consistente deseado en la salida. Se pueden efectuar pruebas similares que resultan más confiables al efectuarlas en plantas piloto, con equipo construido a escala reducida, pero esencialmente los principios son los mismos.

Aun cuando estas técnicas son muy simples, se determinan experimentalmente la velocidad de sedimentación y el tiempo de retención necesario. Esta experimentación comprende pruebas efectuadas en el laboratorio y en plantas piloto con equipo seleccionado de acuerdo a algún trabajo en particular.

Es preferible efectuar estas pruebas con muestras reales, en vez de hacerlo con muestras sintéticas. Cantidades pequeñas de algún material pueden alterar las propiedades de los sólidos en suspensión, con lo que se tendrá un efecto muy marcado en las características de sedimentación (como agentes humedecedores). No debe subestimarse a estos materiales en los procedimientos analíticos usuales. Los fabricantes de equipo para sedimentación tienen laboratorios muy completos para hacer las pruebas solicitadas por sus clientes. Tienen, además, muchos datos referentes a unidades en operación

Información requerida por el vendedor

1. Datos físicos y químicos.

   a. Descripción completa y análisis de lo alimentado, incluyendo el pH.
   b. Velocidades de la sedimentación, si se conoce el dato.
   c. Toxicidad, inflamabilidad y otras propiedades de peligro.
   d. Calidad y consistencia de los productos deseados, incluyendo la relación de peso de líquidos a sólidos y sólidos máximos admisibles en líquido claro.
   e. ¿Va a usarse líquido claro?
   f. ¿Va a tenerse corriente subsuperficial?

2. Condiciones de operación.

   a. Velocidad de la alimentación.
   b. Temperatura de operación.
   c. ¿Va a conservarse el calor?
   d. Operación externa e interna.
   e. Análisis y variaciones máximas de las condiciones de alimentación.

3. Materiales de construcción.

Sugiera los materiales más apropiados para manejo de sustancias corrosivas. En equipos de gran tamaño deberá disponerse de cubiertas protectoras. En algunos casos se admite una cantidad pequeña de corrosión, especialmente si los productos corrosivos forman una costra que pueda prevenir corrosión futura.

4. Varios.

   a. Suministro de energía eléctrica.
   b Descripción del lugar.

c. Resistencia del terreno.
d. Carga admisible en el terreno.
e. Descripción y contorno exteriores del lugar donde está el equipo.
f. Accesibilidad a ferrocarril y carretera.
g. Facilidades disponibles en el sitio, antes de la construcción de la planta.

REFERENCIAS

1. Brown, G. G., *et al.*, *Unit Operations*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.
2. Coe, H. S. y G. H. Clevenger, *Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs.*, 55, 356 (1916).
3. Perry, John H. *Chemical Engineer's Handbook*, 3a. Ed., McGraw Hill Book Co., New York, 1950.

CAPITULO 18

DISEÑO DE TUBERIAS

Ningún libro sobre ingeniería de proyecto de plantas de proceso estaría completo si le faltase el capítulo de tuberías. Se podría escribir un libro completo que comprendiera toda la información correspondiente a una sola fase de tuberías. Por lo mismo, la información que se incluye en este capítulo es muy general. Es de esperarse que este material despierte interés en el lector y que pueda servir como punto de partida para estudios adicionales, los que podrán hacerse utilizando los libros de la bibliografía indicada en el capítulo. Se ha hecho un intento para cubrir las necesidades en lo que se refiere a materiales y accesorios más usados en las tuberías para las plantas de proceso, y de los diferentes sistemas que se tienen en todas las plantas.

Se cree que no hay ningún otro producto industrial tan relacionado con el progreso del género humano como el tubo. Desde tiempos muy remotos ya se conocían muy bien los conductos de una u otra especie para transporte de agua, quizá desde siglos antes del inicio de registros en la historia.

Se creó la máquina de vapor de émbolo a fin de desalojar el agua de filtración de las minas de Cornwall, Inglaterra. Además del desarrollo de la máquina en sí, no cabe duda de que se requirió de mucho ingenio para proporcionar la tubería capaz de resistir las cargas hidráulicas. Durante varios cientos de años se emplearon bombas y otros dispositivos para el movimiento de aguas, antes que se usaran las bombas impulsadas por vapor. En el año de 1581, un holandés de nombre Peter Morrys instaló una bomba impulsada por agua para el London Bridge Water Works, a fin de aumentar el suministro de agua a Londres. Este dispositivo se construyó totalmente de madera. Las ruedas de paletas localizadas en el río Támesis proporcionaron la potencia necesaria. La rotación del eje de la rueda de pale-

tas daba movimiento, mediante engranes de madera y manivelas, a una serie de pistones cada uno de los cuales actuaba independientemente como si fuera una bomba.

Muchas de las tuberías usadas antiguamente fueron construidas de troncos de madera agujerados, o de duelas de madera similares a las de los barriles. Estas tuberías proporcionaban servicio muy satisfactorio. También se usaron varios tipos de terracota, u otros productos de barro, sobre todo para drenaje, tal como actualmente se les utiliza. En el siglo XVII se empezaron a usar tuberías de hierro fundido. Algunas de las tuberías originales aún siguen en uso. Antiguamente eran muy usadas las tuberías de plomo. Quizá fue éste el primer metal usado en tuberías.

Desde principios de este siglo, la generación de energía a partir de vapor ha recibido fuerte impulso. Las primeras tuberías utilizadas se construyeron para satisfacer las necesidades de presión de las diferentes operaciones hidráulicas de las plantas de vapor. Se ha mejorado la fabricación de tuberías, pero cada fabricante atiende las necesidades específicas de sus clientes.

En contraste con los métodos primeramente usados para la fabricación de tuberías, éstas se fabrican actualmente por muy diferentes procesos y de diferentes materiales, tales como acero al carbono, aleaciones de acero, latón, vidrio, plásticos y hule. El acero y las aleaciones de acero son los materiales más comúnmente usados en la fabricación de tubos. La fabricación del tubo puede hacerse ya sea a partir de placa plana para una forma cilíndrica, utilizando algunos de los métodos de soldadura conocidos (tope, traslape, resistencia, fusión y espiral), o por la horadación de un lingote caliente, utilizando para ello rodillos giratorios, como se muestra en la Fig. 18-1. El método de horadación de lingote produce tubo sin costura, que puede usarse para resistir esfuerzos de valor muy elevado; se le usa especialmente en operaciones en las que se tienen temperaturas y presiones altas. El método es similar al utilizado en la fabricación de tubo sin costura, con excepción de que en éstos las tolerancias son más rígidas.

A principios de este siglo, un grupo de ingenieros consultores, junto con varios consumidores e ingenieros de fábricas, se echaron a cuestas la tarea de estandarizar los diferentes códigos y prácticas hasta entonces existentes. El Code for Pressure Piping[48] da una breve descripción de este trabajo. El código[48] a que se hace referencia en este capítulo, puede aplicarse a todas las instalaciones de tuberías, con excepción de ciertas tuberías utilizadas en plantas de generación de calor y de varias tuberías especificadas por el gobierno norteamericano. El último logro de los comités de trabajo de estos códigos fue la aceptación de código para todas las agencias del gobierno, incluyendo las municipales, estatales y federales, constituyendo así un instrumento de control en las instalaciones de tuberías.

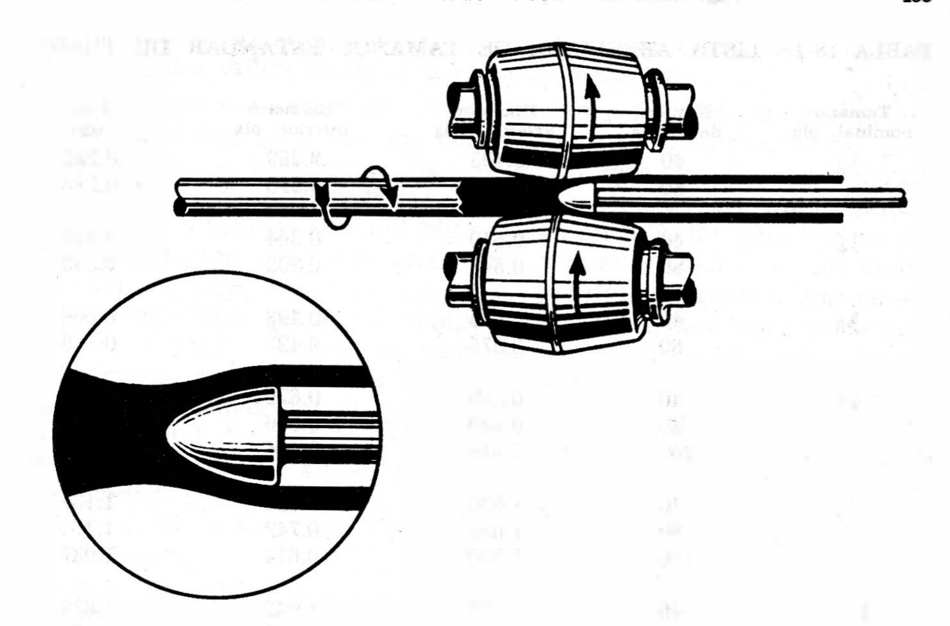


FIG. 18-1. Horadación de un lingote cilíndrico para fabricación de tubo sin costura. (Seamless Steel Institute.)

Su desarrollo ha sido muy favorable a la industria; aun cuando su uso no es obligatorio, ha recibido mucha difusión en las instalaciones de proceso.

DENOMINACIONES USUALES

Diámetro de los tubos

Los tubos y productos tubulares pueden obtenerse en una gran variedad de tamaños y materiales. Debido a que el acero al carbono es el material más comúnmente usado en tuberías, más que el plástico y que algunas otras aleaciones y metales, resulta muy común referir las denominaciones a tuberías de acero, utilizando las iniciales I. P. S.*

Se especifica el diámetro de un tubo mediante un valor nominal, el que corresponde a su diámetro real, solamente para los tubos de más de 12 plg. Así un tubo de 2 plg I.P.S. tiene un diámetro exterior de 2.375 plg y un diámetro interior que puede variar desde 2.157 hasta 1.503 plg de acuerdo al espesor requerido. Se tienen variaciones de 1/8 de plg en tubos de acero de más de 24 plg de tamaño nominal, hasta tamaño nominal de 30 plg (véase Tabla 18-1). En todos estos tamaños se tienen 200 o más variaciones de espesor, de

* I.P.S. son las siglas correspondientes a "Iron Pipe Size" (Diámetro de tubo de hierro). (N. del T.)

TABLA 18-1. LISTA ABREVIADA DE TAMAÑOS ESTANDAR DE TUBOS

Tamaño nominal, plg	Número de cédula	Diámetro exterior, plg	Diámetro interior, plg	Peso lb/pie
1/8	40	0.405	0.269	0.245
	80	0.405	0.215	0.314
1/4	40	0.540	0.364	0.425
	80	0.540	0.302	0.535
3/8	40	0.675	0.493	0.568
	80	0.675	0.423	0.739
1/2	40	0.840	0.622	0.851
	80	0.840	0.546	1.088
	160	0.840	0.466	1.304
3/4	40	1.050	0.824	1.131
	80	1.050	0.742	1.474
	160	1.050	0.614	1.937
1	40	1.315	1.049	1.679
	80	1.315	0.957	2.172
	160	1.315	0.815	2.844
1 1/2	40	1.900	1.610	2.718
	80	1.900	1.500	3.632
	160	1.900	1.337	4.866
2	40	2.375	2.067	3.653
	80	2.375	1.939	5.022
	160	2.375	1.689	7.445
3	40	3.500	3.068	7.58
	80	3.500	2.900	10.25
	160	3.500	2.624	14.33
4	40	4.500	4.026	10.79
	80	4.500	3.826	14.99
	160	4.500	3.438	22.51
6	40	6.625	6.065	18.98
	80	6.625	5.761	28.58
	160	6.625	5.189	45.30
8	40	8.625	7.981	28.56
	80	8.625	7.625	43.4
	160	8.625	6.813	74.7

las cuales quizá algunas 100 son difíciles de obtener, salvo que se tenga alguna orden especial para su fabricación.

Los tubos nominales de tamaño mayor a 3/8 de plg, que se listan en al Tabla 18-1, son los más utilizados en las plantas de proceso. La lista es incompleta. Se pueden obtener también en tamaños de 1 1/2, 2 1/2, 3 1/2 y 5 plg, aunque no son de uso muy común. Los tamaños inferiores a 1/2 plg se usan en tuberías para equipo de instrumentación y algunas veces para pequeños drenados. Los tubos de diámetro pequeño no se utilizan en plantas de proceso, aun cuando se tenga gasto pequeño. Debido a la poca rigidez estructural que tienen, se hace necesario colocar soportes intermedios. También es conveniente proteger a los tubos de diámetro pequeño durante el periodo de construcción de la planta. Además, resulta más fácil la obstrucción total de un tubo pequeño debido a sarro o a la presencia de materia extraña en su interior. A fin de asegurar una buena estabilidad estructural, se acostumbra especificar tubo de pared gruesa (cédula 80) para tubos de tamaño inferior a 1 1/2 o 2 plg de diámetro.

Para los tubos de acero inoxidable, hierro fundido y materiales no ferrosos hay una gran variedad de tamaños de espesores. No se incluye la información descriptiva de ellos, ya que no se usan tan ampliamente como los tubos de acero al carbono; sin embargo, en las referencias se menciona a la mayoría de los materiales comúnmente utilizados.

Los tubos de diámetros pequeños se construyen de un determinado diámetro exterior, con paredes de diferentes espesores y tolerancias muy estrechas. Con frecuencia se especifican de acuerdo a un diámetro exterior exacto (dentro de las tolerancias permitidas). El espesor de la pared se especifica por un número con el que se expresa su calibre. Por lo general, estos tubos son de diámetro menor a 2 plg. Se fabrican en una gran variedad de diámetros y espesores de pared, y se les usa bastante en instrumentos y para transporte de fluidos.

Número de célula

La Tabla 18-1 constituye una lista condensada de los tamaños nominales de tubos. Se incluye solamente una parte de la variedad de pesos y tamaños nominales en que se fabrican. Todas las columnas de la Tabla se explican por sí mismas, con excepción de la columna correspondiente al número de cédula. Este número se obtiene en forma aproximada a partir de la expresión

$$\text{Número de cédula} = 1\,000P/S$$

donde P = presión manométrica interna en lb/plg^2
S = esfuerzo admisible de trabajo en lb/plg^2

Esta expresión está basada en la fórmula para el cálculo del espesor del tubo:

$$t = \frac{PD}{2S} + C$$

donde D = diámetro exterior del tubo en plg
t = espesor del tubo en plg
C = tolerancia por corrosión, en plg

Por lo tanto, el número de cédula es una expresión que resulta aproximadamente proporcional a la relación entre la presión de trabajo y el esfuerzo admisible, así como también a la relación entre el espesor corroído y el diámetro.

Antes que se usaran los números de cédula, se designaba al espesor de los tubos por los términos estándar, extrafuerte y doble extrafuerte. El tubo de 10 plg de diámetro en cédula 40 corresponde a peso estándar, y el tubo de 8 plg en cédula 80 corresponde a tubo extrafuerte. En algunos tamaños de tubos se ha descontinuado el tamaño doble extrafuerte y en su lugar se fabrica el tubo de cédula 160. Las designaciones antiguas han ido desapareciendo gradualmente.

Materiales de construcción

Se tienen más de 150 materiales diferentes especificados por la American Society for Testing Materials (ASTM) para usarse en la fabricación de tubos. Entre ellos se incluyen el acero al carbono, aleaciones de acero y una amplia selección de materiales no ferrosos. La ASTM y la ASME (American Society of Mechanical Engineers)[3] han proporcionado un servicio invaluable en la preparación detallada de las especificaciones de la gran cantidad de materiales disponibles.

Al parecer, el acero continúa siendo el material más importante utilizado en las tuberías. Su empleo resulta ser muy necesario para las condiciones de servicio severo que existen en las industrias de proceso, en lo que a presión y temperatura se refiere. Sin embargo, las tuberías de plástico están siendo muy usadas para servicios de temperatura y presión bajas. En el periodo de 1950 a 1954 la venta de plástico para tuberías subió de cinco a 30 millones de libras por año. El polietileno, el cloruro de polivinilo, el poliestireno, la aceticelulosa de butirilio, y el estireno-butadieno-acrilonitrilo, se han usado con mucho éxito para la conducción de agua y de muchas sustancias químicas corrosivas. Muchos fabricantes estan produciendo válvulas y accesorios de cloruro de polivinilo y de poliestireno, que cuestan menos que las válvulas y accesorios de aleaciones de acero.

El tubo de plástico se instala muy fácilmente. El peso ligero y las propiedades del plástico hacen que sea de manejo muy fácil, por

lo que su uso resulta ser muy económico. Sin embargo, no se puede hacer una comparación de costos de tuberías de plástico ya que se están experimentando cambios muy rápidos en esta nueva industria. El ingeniero debe estar atento para evaluar los méritos de cada producto nuevo. La industria se desarrolla en forma muy rápida y el consumo de tubos y accesorios de plástico se incrementa en gran forma.

Existen otros materiales que han probado ser muy valiosos para trabajar con sustancias corrosivas. Entre ellos se incluyen tubos de acero forrados con hule, acero forrado con plomo y al vidrio. Estos materiales pueden resistir presiones y temperaturas tan altas como el plástico, con la ventaja de que trabajan varios años en forma muy satisfactoria.

La ASTM especifica las descripciones de cada tipo de metal convencional usado en tuberías; esto incluye el proceso de manufactura, composición química, propiedades de tensión, propiedades de flexión y procedimientos requeridos para hacer las pruebas. Estas especificaciones deben leerse con cuidado, ya que son de mucha ayuda para que el diseñador seleccione el material más adecuado para un determinado servicio. Las generalizaciones siguientes pueden servir como una guía en la evaluación de los materiales para tuberías descritos por la ASTM.* Sin embargo, debe consultarse a un metalurgista para la selección de los materiales cuando se presenten problemas especiales.

I. Proceso.

A. Los hornos eléctricos y de hogar abierto son mejores que el Bessemer porque en ellos se tiene un mejor control de la calidad.
B. Los aceros al carbono desoxidado son de estructura más uniforme y son mejores para formación en frío o en caliente que los aceros al hogar abierto (o encerrados).
C. Los aceros calmados al silicio tienen esfuerzos al deslizamiento mayores que los aceros calmados al aluminio.
D. Los aceros oxidados con silicio y aluminio son preferibles para servicios de temperatura baja.

II. Composición química.

El aguante a la corrosión se ve afectado por la soldabilidad, propiedades de formación, resistencia y costo. Una discusión completa cubriría una gran área de la metalurgia. Algunas generalizaciones de valor son:

A. Alto carbono y manganeso.
   1. Alta resistencia y esfuerzo de cedencia a temperaturas moderadas.
   2. Menor soldabilidad y menor ductibilidad.
B. Silicio.
   1. Aumenta la resistencia a la oxidación.
   2. Mejora la resistencia al impacto.
C. Fósforo y azufre; objecionable excepto en cantidades pequeñas.
D. Molibdeno y tungsteno; mejora la resistencia al deslizamiento.
E. Cromo.

---

* Adaptada con permiso de *Piping Engineering*, 2.01 Tube Turns, Inc. Louisville Kentucky (1947-53)

1. Impide la grafitización.
2. Resistente a ciertos agentes corrosivos, tales como compuestos de azufre.
3. Los aceros con cromo y molibdeno combinan las características de gran resistencia al deslizamiento, con resistencia a la oxidación a altas temperaturas y a la corrosión.

F. Níquel; le da fuerza al acero, particularmente a temperaturas subatmosféricas.

G. Aleaciones de níquel-cromo.

1. Alta resistencia al deslizamiento.
2. Resistente a la corrosión para muchas sustancias.
3. El colombio o el titanio actúan como agentes estabilizadores en estas aleaciones para prevenir la precipitación del carburo a temperaturas altas.
4. El molibdeno mejora la resistencia de estas aleaciones a la corrosión.

III. Propiedades de tensión; la comparación de la resistencia última y del esfuerzo de cedencia son de ayuda para medir la calidad.

IV. Pruebas; los tipos de pruebas y requerimientos de las mismas dan una evidencia de la adaptabilidad del material para un determinado servicio.

A. Hidrostática; para protección contra defectos.
B. Verificación de los análisis y de la prueba de tensión para tener la seguridad de las especificaciones físicas y químicas.
C. Flexión; adaptabilidad a las operaciones flexionantes indicadas.
D. Aplastamiento; indica adaptabilidad para formación y para la verificación de la calidad de las soldaduras en el tubo.

En la Tabla 18-2 se da una lista de algunos tipos de productos tubulares usados en las tuberías. Esta lista es similar a la que proporciona el código, con excepción de que no proporciona los esfuerzos admisibles, los que varían de acuerdo a la temperatura.

TABLA 18-2. LISTA ABREVIADA DE TUBOS Y MATERIALES TUBULARES

Material	Especificación ASTM	Resistencia última a tensión	
Acero sin costura (calmado al silicio)	A-106 Grado A	48 000	
Acero sin costura (calmado al silicio)	A-106 Grado B	60 000	
Acero sin costura	A-53 Grado A	48 000	
Acero sin costura	A-53 Grado B	60 000	
Acero sin costura	A-83 Grado A	—	Tubería para calderas
Acero sin costura	A-120	—	Uso restringido
Acero soldadura de solapa	A-53	45 000	
Acero soldadura a tope	A-53	45 000	
Acero soldado por fusión eléctrica	A-155 Grado C45	45 000	
Acero soldado por fusión eléctrica	A-155 Grado C50	50 000	
Acero soldado por fusión eléctrica	A-155 Grado C55	55 000	
Acero soldado por resistencia eléctrica	A-135 Grado A	48 000	
Acero soldado por resistencia eléctrica	A-135 Grado B	60 000	

Los números de la ASTM no especifican completamente los tubos. Es de esperarse que las futuras especificaciones que se hagan para tubos de acero al carbono sean más específicas, de tal manera que con un número simple sea suficiente para especificarlo completamente. A modo de ilustración citemos el caso ASTM A-106. Con esto se especifica que es un tubo sin costura por lo que no será

necesario considerar una clasificación diferente tal como soldado a tope o soldado a solapa; pero sí es necesario especificar el grado.

Las especificaciones más comunes para tubos de acero al carbono usados en trabajos de proceso, son la ASTM A-53 y la ASTM A-106, las que se refieren únicamente a tubos sin costura. Estas dos especificaciones esencialmente son iguales, con la única diferencia que la ASTM A-106 está sujeta a certificaciones más rígidas de sus componentes y de los métodos de fabricación. La ASTM A-106 se especifica para condiciones de servicio severo para las que un acero al carbono puede usarse en forma satisfactoria, y para tuberías que requieran de flexiones especiales. Su costo es de 4 a 7% mayor que el de la ASTM A-53.

Para tubos de menos de 2 plg, que no sea factible conseguirlos con especificaciones ASTM A-53 y A-106, podrá utilizarse la ASTM A-83, la que también es para tubo sin costura y sus propiedades son similares a la A-53 y a la A-106.

Muchas empresas tienen en sus almacenes sólo ASTM A-106. Esto reduce los inventarios y elimina la posibilidad de instalar tuberías de grado inferior en servicios de presión alta.

Hay cierto número de especificaciones de tuberías que no son muy apropiadas para los fluidos de un proceso determinado, pero que pueden ser usados en ciertos servicios tales como flujo de aire de baja presión, vapor de escape (presión manométrica de 15 lb/plg^2 o menos), agua y condensado de baja presión. El código restringe el uso de tubos y accesorios de hierro fundido para el caso de tener servicios de presión y temperaturas bajas. Por lo tanto, las tuberías de hierro fundido se usan solamente en ciertos casos.

Los tubos de aleaciones de acero, materiales no ferrosos y plástico, son de uso normal en ciertos servicios. En caso de algunos servicios especiales, podrán determinarse en el laboratorio los materiales más adecuados para los mismos. Desde luego que casi siempre será posible seleccionar tubos de aleación de acero a los que se les ha usado durante muchos años para manejo de sustancias corrosivas. Sin embargo, el costo del tubo de aleación es mayor que el costo del tubo de acero al carbono. Obviamente sería un despilfarro usar materiales muy costosos con vida ilimitada en aquellos procesos que están sujetos a modificaciones frecuentes. Sin embargo, para ciertos procesos es necesario usar materiales de aleación para proteger la calidad del producto.

La selección de los materiales deberá estar influida por los costos de fabricación y erección. Se pueden usar materiales que son muy baratos, pero que no sería muy práctico su uso porque los costos de fabricación e instalación son elevados.

UNION DE TUBOS

Durante muchos años el único método práctico para unir tubos fue el de conectar sus extremos roscados con bridas u otros dispositivos con rosca, tales como accesorios, válvulas y uniones (Fig. 18-2). Se produjeron mejorías con el uso de la soldadura del acero al carbono con oxiacetileno, o mediante algún otro proceso de soldadura; posteriormente el proceso de soldadura de arco eléctrico cubierto redujo el valor de la mano de obra y produjo unión completamente sellada y junta más resistente[33]. Actualmente, la unión de tubos roscados se limita a tamaños de 1 1/2 o 2 plg o para tubos de diámetro menor. Los tubos de tamaño menor se unen mediante bridas, de modo que su desmantelamiento resulte fácil. Todos los demás tubos de un sistema continuo son unidos mediante soldadura. Las juntas bridadas consisten de dos bridas, un empaque o dispositivo que sirve para el mismo propósito y el número necesario de tornillos para hacer la unión.

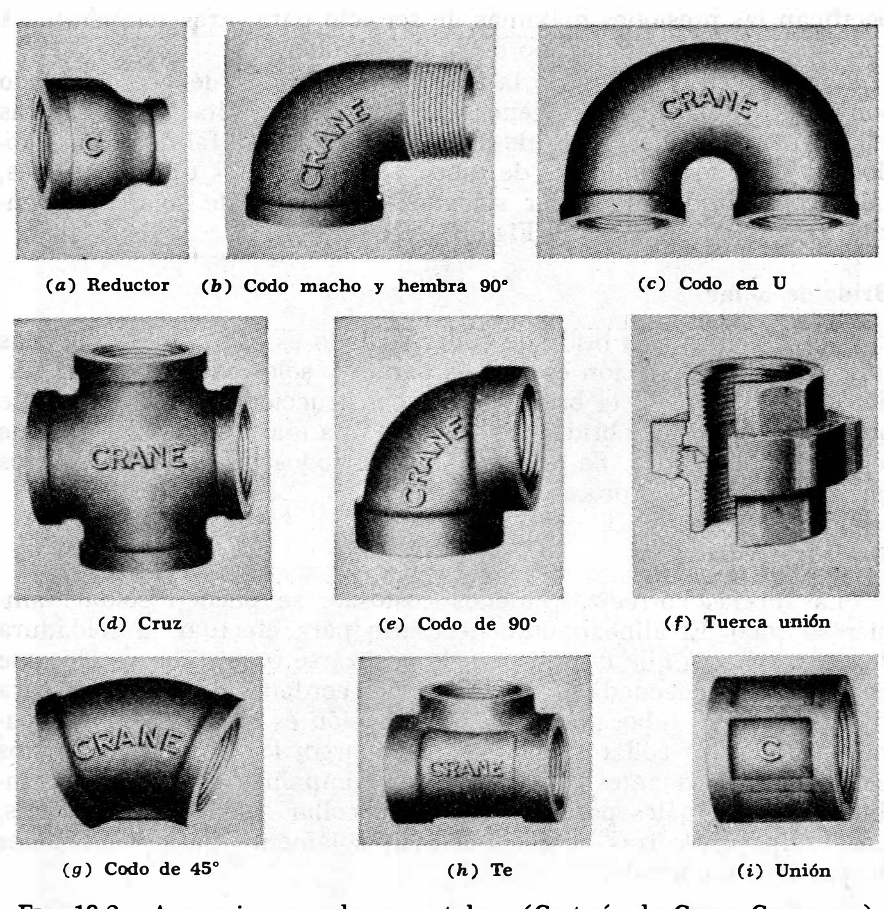
Unidades roscadas

Las uniones de tubos de acero roscados se efectúan utilizando uniones y acoplamientos. Las uniones tienen los mismos fines que las bridas en cuanto al fácil desmantelamiento de los tubos. Las juntas soldadas se usan en tramos pequeños, pero por lo general no son ni prácticas ni económicas.

En algunos trabajos se requiere usar cordones de soldadura después que se ha efecuado la junta roscada. Esto se hace en aquellos servicios en los que se tienen presiones elevadas o para fluidos que es difícil contener, tal como ciertos gases que pueden pasar a través de la junta roscada. El sellado mediante soldadura podrá distorsionar los accesorios soldados si no se toman las precauciones adecuadas. En juntas roscadas que van a ser selladas con soldadura, no deberán usarse lubricantes o los compuestos que convencionalmente se utilizan, pues afectan a la soldadura.

La unión de hierro maleable tipo "Oil malleable"* se usa en servicios de temperatura y presión moderadas. Debido a que las uniones de acero forjado tienen mucha resistencia, se les usa en todos los servicios de procesos (menores de 3 plg) que requieren de presión y temperaturas elevadas. Estas uniones son maquinadas con exactitud, de tal modo que su colocación no requiere de empaques (Fig. 18-2). Algunas de estas uniones están equipadas con un anillo de metal suave (bronce o latón) que está asegurado en uno de los dos lados de la unión. Las uniones así construidas pueden ponerse y quitarse muchas veces sin que por ello pierdan su efectividad. Algunos de estos dispositivos están equipados con fibras insertadas, pero su operación no es muy satisfactoria cuando la

* No se tiene una equivalencia exacta en castellano. (N. del T.)



(*a*) Reductor (*b*) Codo macho y hembra 90° (*c*) Codo en U

(*d*) Cruz (*e*) Codo de 90° (*f*) Tuerca unión

(*g*) Codo de 45° (*h*) Te (*i*) Unión

FIG. 18-2. Accesorios roscados para tubos. (Cortesía de Crane Company.)

junta debe separarse a intervalos frecuentes de tiempo, ya que estos insertos se destruyen al efectuar los cambios.

En los catálogos de los fabricantes[7,13,29,31,32] se indican los valores de la presión y temperatura que pueden soportar estos accesorios.

Juntas bridadas

Las bridas estándar de acero forjado se clasifican como ASA* 150 lb, 300 lb, 400 lb, 600 lb, 900 lb, 1 500 lb y 2 500 lb. Estas cantidades indican el valor de la presión que deba aplicarse. Por ejemplo, la brida de 150 lb es apropiada para trabajar a 150 lb/plg^2 manométricas y 500°F. Las demás denominaciones son para temperaturas de 800°F y 850°F, correspondiendo a uniones de caras saliente y tipo de anillo, respectivamente. En el código[48] se es-

* American Standars Association (4).

pecifican las presiones máximas de servicio para otras temperaturas correspondientes a cada tipo de brida y material.

Las especificaciones de la ASTM para bridas de acero forjado son la A-181 para servico general, la A-105 para altas temperaturas y la A-182 para aleaciones de acero. Las bridas se fabrican para todos los tamaños nominales de tubos y en diferentes tipos generales, tales como bridas de collar soldado, corredizas, de solapa, de enchufe y roscadas (véase la Fig. 18-3).

Brida de collar

Probablemente la brida de collar soldado es el tipo de brida más utilizado. Su instalación es la más barata y sólo requiere de un cordón de soldadura. Esta brida, por su construcción, es más resistente que los otros tipos de bridas. Consiste de una masa larga y cónica que le da mucha rigidez. Se le usa para casi todos los servicios severos que se tienen en los procesos.

Brida corrediza

Las bridas corredizas, menos costosas, se pueden soldar también al tubo. El alineamiento necesario para efectuar la soldadura se simplifica, ya que la brida puede deslizarse en el tubo y colocarse en la posición adecuada. Se requieren dos cordones de soldadura para fijar la brida al tubo; por esto su instalación es más costosa que para las bridas de collar soldado. Sin embargo, los estudios de costos hechos por fabricantes de tubos y por compañías constructoras, indican costos iguales para las bridas de collar soldado y corredizas. Las bridas corredizas se recomiendan solamente para condiciones de servicio moderado.

Brida de solapa

La brida de solapa se usa con un casquillo corto. Mediante un cordón de soldadura se une el casquillo a un extremo del tubo. La brida de solapa tiene algunas ventajas en su fabricación ya que la brida tiene libertad para girar. Por lo tanto, los agujeros para los tornillos no necesitan alinearse cuidadosamente durante la fabricación.

Las bridas de solapa se pueden hacer de aleaciones o de materiales no ferrosos para servicios corrosivos, en los que todos los materiales que están en contacto con el fluido son capaces de resistir las condiciones corrosivas. En las bridas de solapa es posible utilizar casquillos fabricados de material de alta calidad, necesario para resistir las condiciones que le impongan y juntamente con el casquillo se debe usar brida de acero al carbono con lo que se puede tener ahorro de dinero.

En las plantas de proceso, por lo general se necesita desmantelar el equipo para su inspección y limpieza. Algunas veces se usa

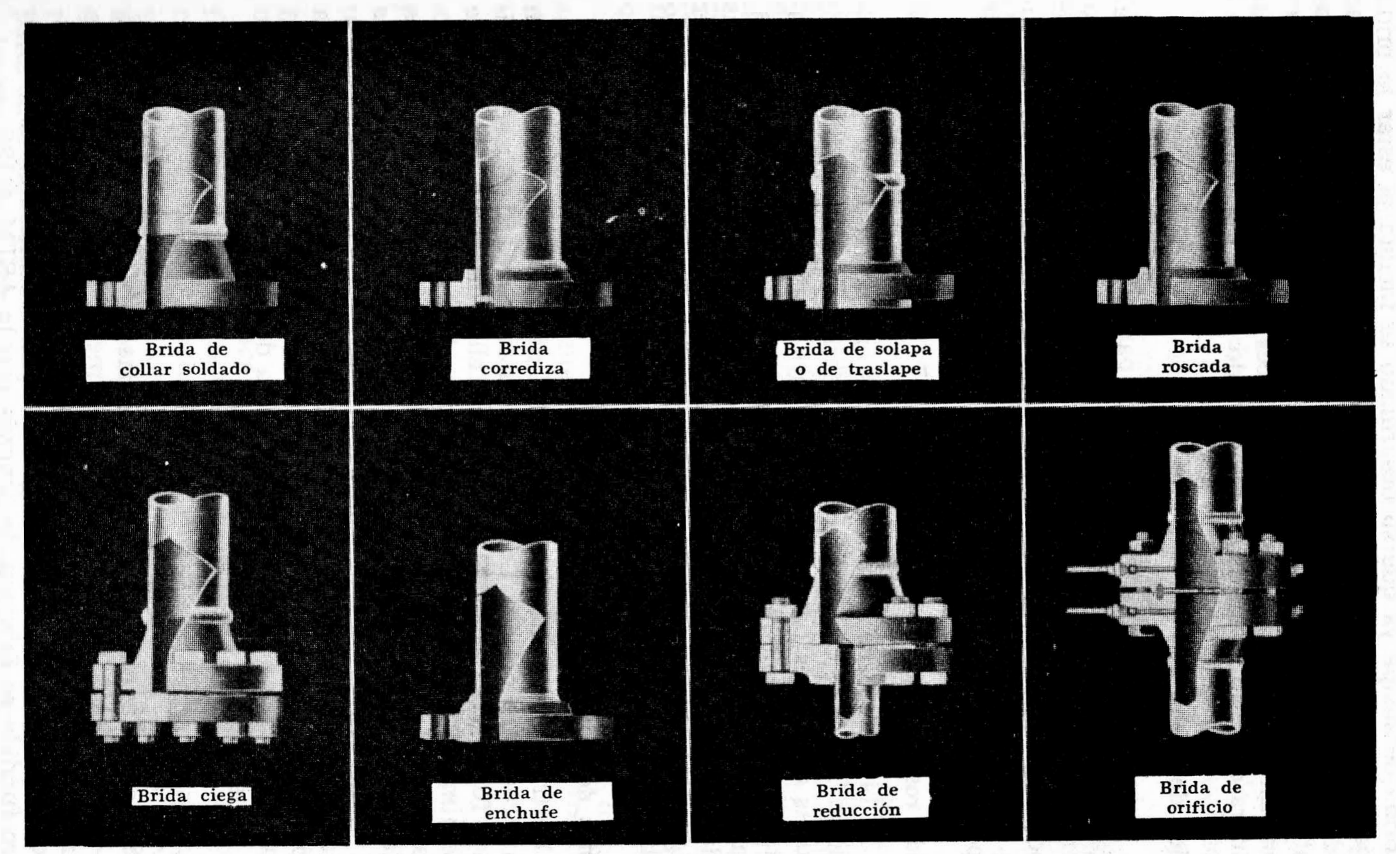


FIG. 18-3. Tipos típicos de bridas. (Cortesía de Tube-Turns Company.)

la brida de solapa ya que su desarmado se facilita al estar la brida floja. Se han hecho algunas modificaciones, en el diseño de las bridas de solapa, que se usan para unir tubos de plástico y de otros materiales no ferrosos que no tienen suficiente resistencia a la flexión. En estas aplicaciones, algunas veces se instala la brida de tal manera que ésta quede por atrás del lado ensanchado de tubo.

Brida de enchufe

La brida de enchufe soldado es muy parecida a la brida corrediza. Esta ha probado ser muy útil para tuberías de diámetro pequeño, operando a presiones altas. A diferencia de la brida corrediza, el tubo se ajusta interiormente en un rebaje que tiene la brida (enchufe). De esta manera el interior de la brida y el tubo presentan una superficie lisa ininterrumpida.

Brida roscada

La brida roscada se usa en los casos en que no puede haber soldadura. Tal es el caso de tuberías de hierro fundido, de tuberías de algunas aleaciones para resistir presiones altas, que no pueden calentarse convenientemente después de haberlas soldado en la obra, y también en el caso de tuberías pequeñas (2 plg o menos). Las bridas roscadas deben usarse en aquellos lugares en que puede ser peligroso el trabajo con soldadura. Sin embargo, debe evitarse el uso de las bridas roscadas a menos que sea absolutamente necesario.

Bridas de anillo

En trabajos de alta presión, las llamadas juntas de anillo se han usado con mucho éxito. Los extremos de los tubos a unir se maquinan a forma cóncava y se coloca entre ellos un anillo convexo que generalmente es del mismo material que el tubo. Las bridas se atornillan en cada una de las secciones del tubo. Al apretar los tornillos de la brida, se hace una fuerza de compresión entre las dos piezas y el anillo convexo. Se tiene rosca gruesa entre el tubo y la brida, de tal modo que la brida no queda muy ajustada sobre el tubo. Esta unión tiene las mismas ventajas que la brida de solapa o traslape en la que las bridas no están fijas para una determinada posición y no son parte integral del tubo.

Hierro fundido

Se tienen dos clasificaciones para bridas de hierro fundido; la ASA 125 lb y la ASA 250 lb tienen respectivamente la misma perforación (refrentado y círculo donde se colocan los tornillos) que las clasificaciones ASA 150 lb y 300 lb para bridas de acero. Las bridas de hierro fundido se fabrican de acuerdo con la ASTM A-126.

Una brida de acero de cara saliente nunca debe unirse a una brida de hierro fundido de cara plana, debido a que la parte saliente de la brida de acero puede sobreesforzar a la brida de hierro fundido. Debido a que está limitada la resistencia a la flexión del hierro fundido, podrá ocasionar falla el apretar demasiado los tornillos de la brida. Por lo mismo, el código y los fabricantes de equipo de hierro fundido recomiendan hacer rebaje en la cara saliente de las bridas de acero, o bien utilizar bridas de cara plana cuando sea necesario unir equipos de acero y hierro fundido.

Se tienen aplicaciones muy limitadas de soldaduras con las tuberías de hierro fundido. Aunque es posible efectuarla bajo condiciones muy controladas, los costos resultan elevados. Por lo tanto, para tuberías de acero las bridas de hierro fundido que se utilicen serán siempre roscadas.

Refrentado de las bridas y empaques

Para que en las uniones mecánicas en tuberías sus miembros no resulten afectados plásticamente, debido al apriete que se tenga en las bridas, es necesario que sus caras estén perfectamente maquinadas o esmeriladas, lo que en sí constituye una junta sellada. A fin de lograr el objetivo anterior sin un exceso de maquinado y pulido, se emplean los empaques. El empaque debe ser de un material que resista las condiciones de servicio y que sea lo suficientemente plástico para que se deforme bajo una suave compresión, de tal manera que con ello se cierren los intersticios que se encuentren en la unión.

La clasificación de la ASA para bridas se refiere a bridas de cara saliente, de enchufe de ranura y lengüeta, de anillo y de refrentado de cara plana (véase la Fig. 18-4). El tipo más común es el de cara saliente. La junta de anillos es la más cara y se le usa en ciertos servicios de trabajo severo. Existen diferentes tipos estándar respecto al maquinado de la parte de la brida que va en contacto con el empaque. Para servicios ordinarios puede ser satisfactorio un acabado normal. Las uniones tipo de anillo, emplean anillos de metal que son más suaves que el material de la brida.

Bridas especiales

Se han diseñado muchos tipos especiales de bridas a fin de satisfacer las necesidades que se presentan en la industria. Ellas incluyen ciertas bridas que se usan comúnmente en la industria petrolera y para manejo de amoniaco. El último diseño corresponde al tipo de lengüeta y ranura, utilizando bridas ovaladas, triangulares o cuadradas. Fue desarrollada a principios de este siglo para sistemas de refrigeración que utilizaban amoniaco; continúa usándose por una parte de la industria. Pueden servir igualmente las bridas tipo ranura y lengüeta o las de tipo de anillo. Estas no tienen ventajas particu-

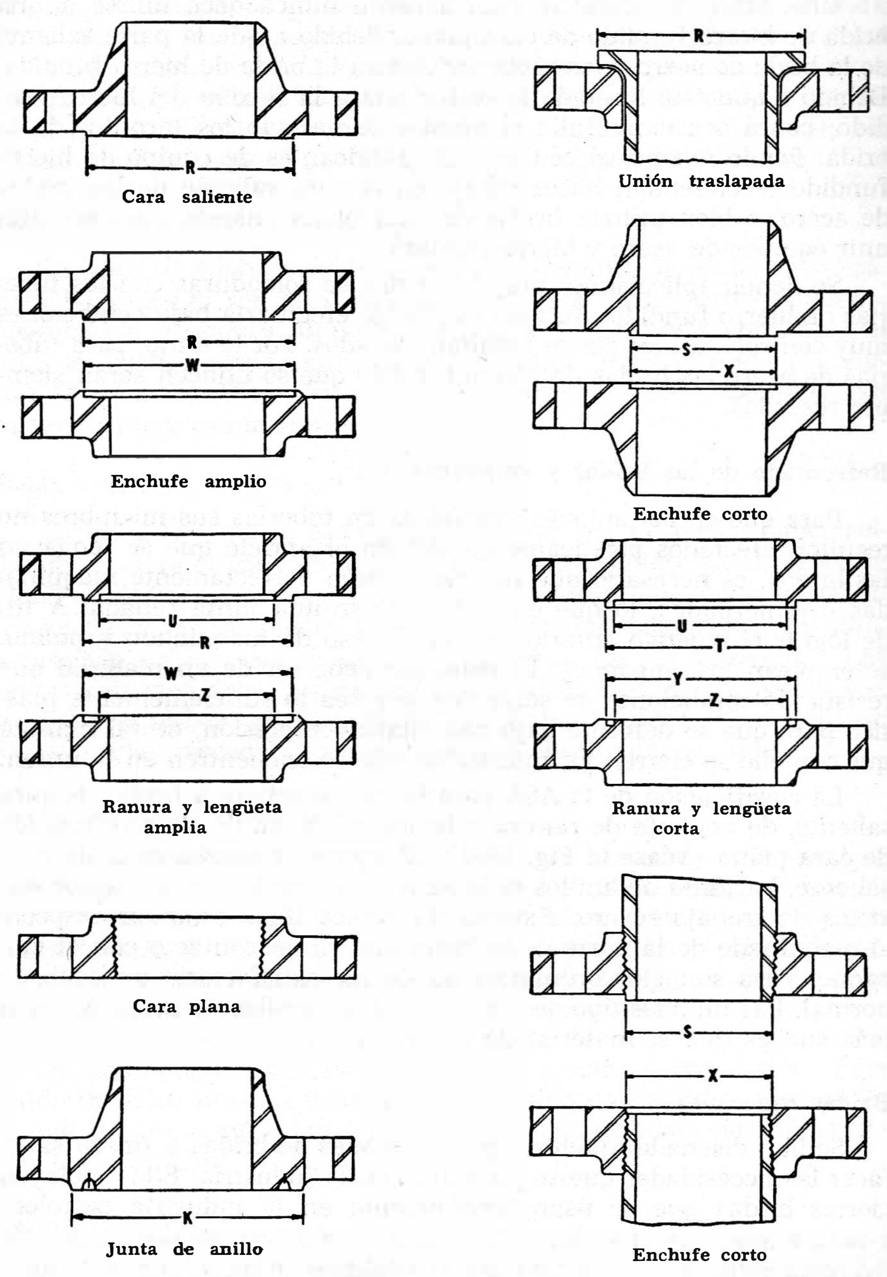


FIG. 18-4. Refrentados de bridas estándar americanas. (Cortesía de Ladish Company.)

lares, teniéndose solamente los problemas de almacenaje al conservar en el almacén varios tipos diferentes de bridas.

Tornillos usados en las bridas

Se usan dos tipos generales de tornillos con las bridas. El más común es una modificación del tornillo máquina ordinario, de acero al carbono, con cabeza cuadrada o hexagonal y tuerca hexagonal. El otro es el llamado espárrago o perno de dos filetes sin cabeza, que consiste de un perno totalmente roscado con dos tuercas hexagonales.

Para las presiones y temperaturas altas que se tienen en las tuberías, deben usarse tornillos de aleaciones de acero, en lugar de acero al carbono, a fin de satisfacer los requisitos de esfuerzos que se presentan. Actualmente se tienen cuatro especificaciones de la ASTM para tornillos y espárragos de material acero al carbono, veinte para aleaciones de acero y doce para tuercas. Vogrin *et al*[30] indican en su estudio de tornillos que el acero al carbono ASTM A-307 Grado B puede ser usado para servicios en que se presenten temperaturas hasta de 450°F. Arriba de 450°F deben emplearse aleaciones de acero correspondientes a las especificaciones A-261, A-354 y A-193 en un número diferente de grados, según sea el valor de la temperatura, la que puede ser hasta de 1 500°F. La especificación A-320, en diferentes grados, se recomienda para temperaturas de −20°F hasta −300°F.

Vogrin recomienda ajuste clase 2A para pernos y clase 2B para tuercas, para trabajar a temperaturas no elevadas. Para temperaturas altas se sugiere ajuste clase 7 para pernos y clase 2B para tuercas. En la Tabla 18-3 se tiene un resumen de especificaciones para atornillado de tuberías.

Otros tipos de bridas

En la Fig. 18-5 se muestra una unión empleada para tubos de material no ferroso o para tubos de acero de diámetro de 1 plg o

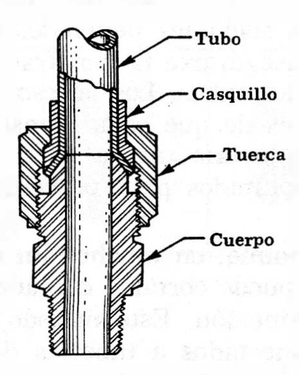


FIG. 18-5. Accesorio abocinado.

menores. En las plantas de proceso estos accesorios se usan fundamentalmente para tuberías utilizadas en equipo de instrumentación.

Se tienen muchos otros métodos usados para unión de tubos, tales como las uniones soldadas que se hacen en trabajos de plomería, las juntas que utilizan plomo fundido para tuberías de hierro fundido y la brida integral, que algunas veces se usa para materiales fundidos y para algunos otros tipos de materiales. Para servicios municipales se usa mucho la unión macho y de campana emplomada para unión de tuberías de hierro fundido para conducción de agua, gas y desagües. La junta mecánica atornillada es más comúnmente usada para tubos de hierro fundido, ya que requiere menor trabajo de instalación que la junta emplomada.

ACCESORIOS DE LAS TUBERIAS

Accesorios para soldarse

Actualmente, en casi todos los sistemas de tuberías de las plantas de proceso se usan accesorios soldados con lo que se evitan dobleces en los tubos. Estos accesorios se manufacturan con diferentes nombres de marcas.[13,25,26] Se pueden obtener conforme a las especificaciones y tamaño de los tubos; pueden ser tes, codos, reductores y tapones para tubo (Fig. 18-6). Casi todos los accesorios son sin costura y son de dimensiones estándar. Por ejemplo, para codos soldados de 90°, de radio grande, éste es de valor 1 1/2 veces el tamaño nominal del tubo. Esta estandarización simplifica el diseño y la construcción.

Se usan procesos muy ingeniosos para la fabricación de los diferentes tubos. Los tubos sin costura se cortan a una longitud predeterminada, y se les fuerza a seguir una determinada forma utilizando para ello un mandril, a fin de producir la curvatura deseada. Si se tiene un buen control se conseguirá obtener espesor uniforme, pared interna lisa y evitar esfuerzos residuales.

Todos los accesorios soldables tienen los extremos biselados, de tal manera que pueda asegurarse la penetración completa de la soldadura al unirlos, con los tubos. Los accesorios pueden conseguirse de los mismos materiales de que están construidos los tubos. Cada accesorio tiene estampada una marca para identificación y los de acero no aleado están pintados para prevenir su corrosión durante su almacenaje.

Por razones de economía, en muchos lugares se restringe el uso de las tes; en su lugar puede cortarse cuidadosamente el tubo y soldarle los ramales de conexión. Este método resulta ser económico para ramales cortos conectados a tuberías de longitud grande. Deben compararse para cada trabajo el costo de las tes confeccionadas

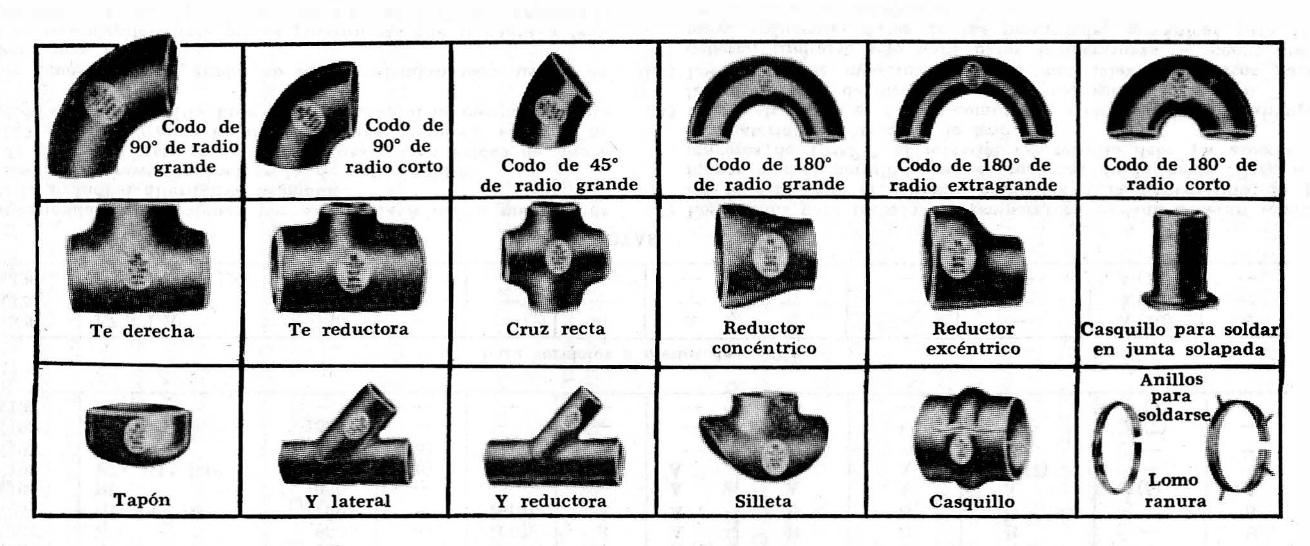


FIG. 18-6. Accesorios soldables a tubos. (Cortesía de Tube-Turns Company.)

TABLA 18-3. MATERIAL DE PERNOS RECOMENDADOS PARA BRIDAS*

Material para pernos				Material para bridas y clasificación de la ASA							
ASTM		Temperatura límite (2) °F	Notas	Hierro fundido		Acero al carbono		Acero al carbono ½% Mo.	Aleación al cromo molibdeno	Aleación cromo, níquel austenítico	Aleación acero al níquel
Especificación	Grado			125 lb	250 lb	150 lb	300-2500 lb				
A307	B	450	—	A	A	B (4)	—	—	—	—	—
A261	BO	850	—	B (3)	B	A	B	B	B	—	B
A354	BB, BC, BD	750	—	B (3)	B	A	B	B	B	—	A
A193	B7	1000	—	—	—	A	A	A	A	A(5)	A
A193	B7a, B14, B16	1100	(6)	—	—	A	A	A	A (7)	—	—
A193	B5	1100	(8)	—	—	—	—	—	B	—	—
A193	B8,B8c, B8t	1500	—	—	—	—	—	—	—	A (7)	—
A193	B8F	—	—	—	—	—	—	—	—	(9)	—
Para servicios a menos de —20°F											
A320	L7 & L10	—150	—	—	—	A	A	—	—	A (10)	A
A320	L	—225	—	—	—	—	—	—	—	A (10)	—
A320	L8, L8c, L8t, L8F	—300	—	—	—	—	—	—	—	A (11)	—

NOTAS

(1) Los pernos recomendados se designan por A y B; la A indica material de preferencia y la B indica alternativa aceptable.
(2) La temperatura límite mostrada incluye la de valor −20°F.
(3) Los pernos, de acuerdo a este grado, pueden usarse con bridas de hierro fundido de 125 lb ASA, usando empaque de cara completa; en caso de usar empaque de anillos se utiliza hule suave o material de comportamiento análogo.
(4) Los pernos de acuerdo a este grado, no se recomiendan para usarse en bridas con empaques metálicos.
(5) Estos pernos se recomiendan para bridas austeníticas que trabajen a temperaturas de 450°F y menos, para evitar la necesidad de un pretensado del perno.
(6) Los grados B14 y B16 proporcionan mayor resistencia que el grado B7a a temperaturas entre 850°F y 1050°F y, por lo tanto, deben usarse para condiciones severas poco usuales.
(7) Los pernos para trabajos de temperatura elevada deberán seleccionarse de tal manera, que el esfuerzo admisible a la temperatura de trabajo sea mayor que el permitido por el material de la brida. Para temperaturas mayores de 1 100°F, el material del tornillo debe ser especial, siendo de un material similar al de la brida.
(8) Este material no es de uso común. Su selección depende principalmente de las necesidades de protección contra corrosión y oxidación.
(9) Los grados de maquinado de los materiales austeníticos para tornillos, deberán limitarse sólo para bajas temperaturas, a menos que el código tenga suficientes datos de las propiedades mecánicas para la obtención de los esfuerzos admisibles.
(10) Estos materiales son los indicados para usarse con bridas austeníticas en servicios de baja temperatura, dentro de los límites indicados de temperatura.
(11) El tornillo austenítico deberá usarse solamente en el intervalo de temperaturas para las que los grados ferríticos no tengan problemas de impacto.

* Reimpreso con permiso de Vogrin, C. M., F. S. G. Williams y J. S., Worth, disertación Núm. 52-PET-7, 7a. Pet. Div. Conf., Amer. Soc., Mech. Eng. (1952).

y la construcción de conexiones ramales, y hacer los trazos siguiendo las especificaciones de la tubería.

Accesorios de bridas

Se fabrican accesorios de bridas, de acero fundido, de acero forjado y de aleaciones de acero para casi todos los tamaños de tubos; estos accesorios tienen la misma clasificación de la ASA para bridas en lo que respecta a temperatura y presión.[7,31] Se usan los accesorios de las bridas ya que tanto éstas como los tornillos y empaques son costosos, y por necesidades de mantenimiento resulta, a veces, necesario quitar algunas conexiones para reparaciones por fugas que ocurran. Actualmente el trabajo de mantenimiento para casi todos los sistemas de tuberías está restringido a accesorios, tales como válvulas, y no a la propia tubería. Debido a que normalmente todas las válvulas de más de 2 plg se instalan con bridas, se utilizan estas mismas uniones para quitar algunas conexiones cuando así se requiere; por lo tanto, en muchos casos no es necesario instalar algunos accesorios adicionales de bridas, a menos que resulte absolutamente indispensable.

Accesorios roscados

Los accesorios roscados para tubos se obtienen en casi todos los materiales y formas (Fig. 18-2).[7,13,29,31,32] Los accesorios de acero forjado tienen mucho uso en las plantas de proceso; se usan para temperaturas elevadas y para servicios de contraincendio; tienen un factor de seguridad alto.

TUBOS DE HIERRO FUNDIDO Y ACCESORIOS

Los tubos de hierro fundido, válvulas y accesorios, por lo general se utilizan para instalaciones bajo tierra, tales como para agua, aire, combustible y desagües y drenes que operan a presiones y temperaturas bajas.

Aunque el tubo de hierro fundido precedió durante varios cientos de años al tubo de acero, no se ha logrado su estandarización tal como ha sucedido con las tuberías de acero y sus accesorios. Esto ha sido por los cambios que se han tenido en los diferentes códigos y en las especificaciones, y por el gran uso y larga vida que tienen los tubos de hierro fundido en las instalaciones municipales.

Los códigos o especificaciones correspondientes a tubos de hierro fundido y accesorios, son los publicados por la American Standards Association (ASA),[4] la American Water Works Association (AWWA),[5] la American Gas Association (AGA),[1] y el gobierno de los Estados Unidos de America.[11].

Hasta 1922, el tubo de hierro fundido era fundido en moldes estacionarios de arena (vaciado en foso de colada). Después de dicho año, casi todos los tubos de hierro fundido han sido producidos por proceso de vaciado centrífugo. En este proceso, el hierro derretido se introduce en moldes giratorios. Debido a la acción de la fuerza centrífuga, los vaciados obtenidos son más compactos y fuertes que los obtenidos por los métodos antiguos de vaciado en foso de colado.

La especificación de la AWWA es obsoleta, ya que cubre solamente a los vaciados en foso de colada. Los tubos fundidos por proceso de centrifugación, debido a que son más compactos, no necesitan tener tanto espesor como los obtenidos en foso de colada, para resistir las presiones a que están sujetos.

Recientemente se han elaborado especificaciones para tubos de hierro fundido en base de las especificaciones federales WW-P-421[11] para tubo fundido por proceso centrífugo. En 1953, la ASA publicó especificaciones para tubo de hierro obtenido centrífugamente.[4] Estas especificaciones están basadas en los trabajos experimentales acumulados por la AWWA, la AGA y la ASTM. Tomaron en cuenta para las especificaciones todas las ventajas de resistencia obtenidas del tubo centrifugado.

Los accesorios de hierro fundido se especifican de acuerdo a la ASA o a la AWWA. La especificación A 21.20 de la ASA es para accesorios de tamaño corto, de 3 a 12 plg de longitud. Estos accesorios requieren menos longitud de tramo para instalación que los accesorios más comunes de la AWWA. Las especificaciones de la AWWA para accesorios, las que continúan usándose, corresponden a tramos de 4 hasta 60 plg de longitud. Solamente la AWWA da especificaciones para accesorios macho y campana, en tamaños mayores de 12 plg.

Hay varias uniones para tubo de hierro fundido. Las más ampliamente usadas en plantas de proceso son la brida mecánica de campana y macho, la de compresión y la de rosca. En la Tabla 18-4 se da una descripción breve de estas uniones.

Los tubos de hierro fundido para fluidos tales como gas o aceite, deben instalarse con soportes intermedios entre las secciones unidas, a fin de poder satisfacer lo estipulado por el Código.

Ya que no es posible tener soldaduras en tuberías de hierro fundido, se dispone de un gran número de uniones. Por lo mismo, los costos de instalación y mantenimiento resultan ser mayores cuando se tienen tuberías de hierro fundido. Esta desventaja, junto con las limitaciones de servicio impuestas por el Código (no se permiten presiones mayores a 400 lb/plg^2 ni temperaturas superiores a 300°F en instalaciones sobre el piso ni presiones de 150 lb/plg^2 y 300°F en instalaciones bajo tierra) restringen el uso de tubos de hierro fundido en las plantas de proceso.

TABLA 18-4. TIPOS DE UNIONES DE HIERRO FUNDIDO

	Descripción	Empaque	Uso común	Observaciones
Campana y macho	El extremo tiene forma de campana, aloja al macho y forma la unión	Plomo y yute torcido	Tuberías de agua bajo tierra, presión hasta 200 lb/plg² Tuberías de gas bajo tierra, presiones menores de 100 lb/plg²	Los fluidos deben estar húmedos, de tal modo que el y permanezca expandido
Tipo mecánico	La parte recta del tubo se coloca en el extremo de forma de campana, se ajusta en el collarín del prensaestopas el cual se ajusta contra el empaque	Hule o compuesto	Tuberías de gas a presiones moderadas también para tuberías de agua	Resistente a vibraciones y a expansiones
Brida	Bridas ASA clase 25, 125 y 250; forman una sola pieza con el tubo o roscadas al mismo	Empaques estándar para bridas de cara plana	Tuberías de agua sobre tierra y para conducción de gas de baja presión	Tuberías de agua sobre tierra y para conducción c gas de baja presión
Acoplamiento por compresión	El extremo plano del tubo de hierro fundido permanece unido por un acoplamiento tipo de compresión	Hule	Gas, aceite y agua	Permite expansión y contracción
Roscado	Acoplamientos roscados similares a los que se tienen con tubos de acero	Ninguno	Residuos no críticos y tuberías de agua	También pueden disponerse juntas de compresión tipo roscadas

VALVULAS

La válvula es el accesorio más importante en la tubería y se consigue en una variedad ilimitada de materiales y diseños.* [7,14,17,20,29,31] Sin embargo, se simplifica el mantenimiento y almacenaje en una planta si se conserva al mínimo el número de tipos de válvulas en existencia. Puede resultar muy económico, tratándose de válvulas pequeñas, seleccionar uno o dos diseños que satisfagan a todos los servicios.

Clasificación

Las válvulas se clasifican como válvulas de compuerta, de globo, de tapón, de retención y de control o maniobra. Se tienen estandarizadas las condiciones de servicio de muchos de los tipos más comunes de válvulas, así como también las dimensiones de las bridas de las válvulas bridadas.[4l,15] Sin embargo, debe hacerse referencia a los catálogos de los fabricantes a fin de determinar las especificacio-

* La publicación [27] permite establecer una comparación entre válvulas de diferentes fabricantes.

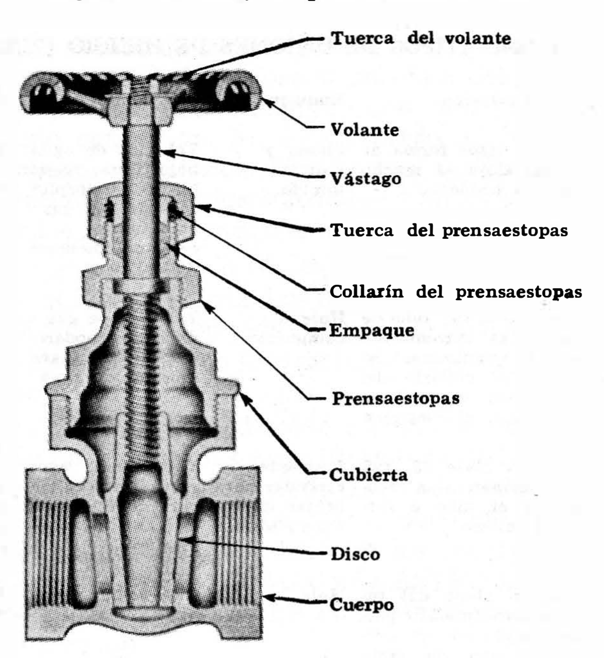


FIG. 18-7. Partes de la válvula. (Cortesía de Crane Company.)

nes y descripciones de cada válvula en particular. Estas descripciones junto con las especificaciones de los códigos y los estándares de válvulas[2,4,11,15,27,28] ayudan a la selección de la válvula más apropiada para un servicio específico.

Nomenclatura

Las válvulas de compuerta y de globo tienen dos partes básicas que son muy similares, el cuerpo y la cubierta (Fig. 18-7). En el cuerpo se tiene el orificio, la parte que cierra el orificio y las bridas necesarias o interiores roscados para conectarse a las tuberías.

La cubierta es la parte superior de la válvula que une y cierra el cuerpo. Contiene el collarín del prensaestopas, los soportes y guías del vástago y el volante de la válvula o dispositivo para cerrar. Hay tres diferentes tipos de cubiertas de válvulas (Fig. 18-8). La cubierta roscada es la más barata y la menos segura. Para ajustar el sello del vástago se requiere atornillar fuertemente la cubierta contra el cuello, lo que con frecuencia causa distorsión en el cuello de la válvula. La cubierta está diseñada para que la válvula pueda fácilmente desarmarse. La presión del fluido actúa a manera de sello, haciendo más rígida la junta. No ocurren distorsiones por armado y desarmado repetido. La cubierta bridada atornillada tiene empaque atornillado y prensaestopas muy grande. Este es el diseño más firme y es el utilizado en casi todos los procesos grandes tanto para

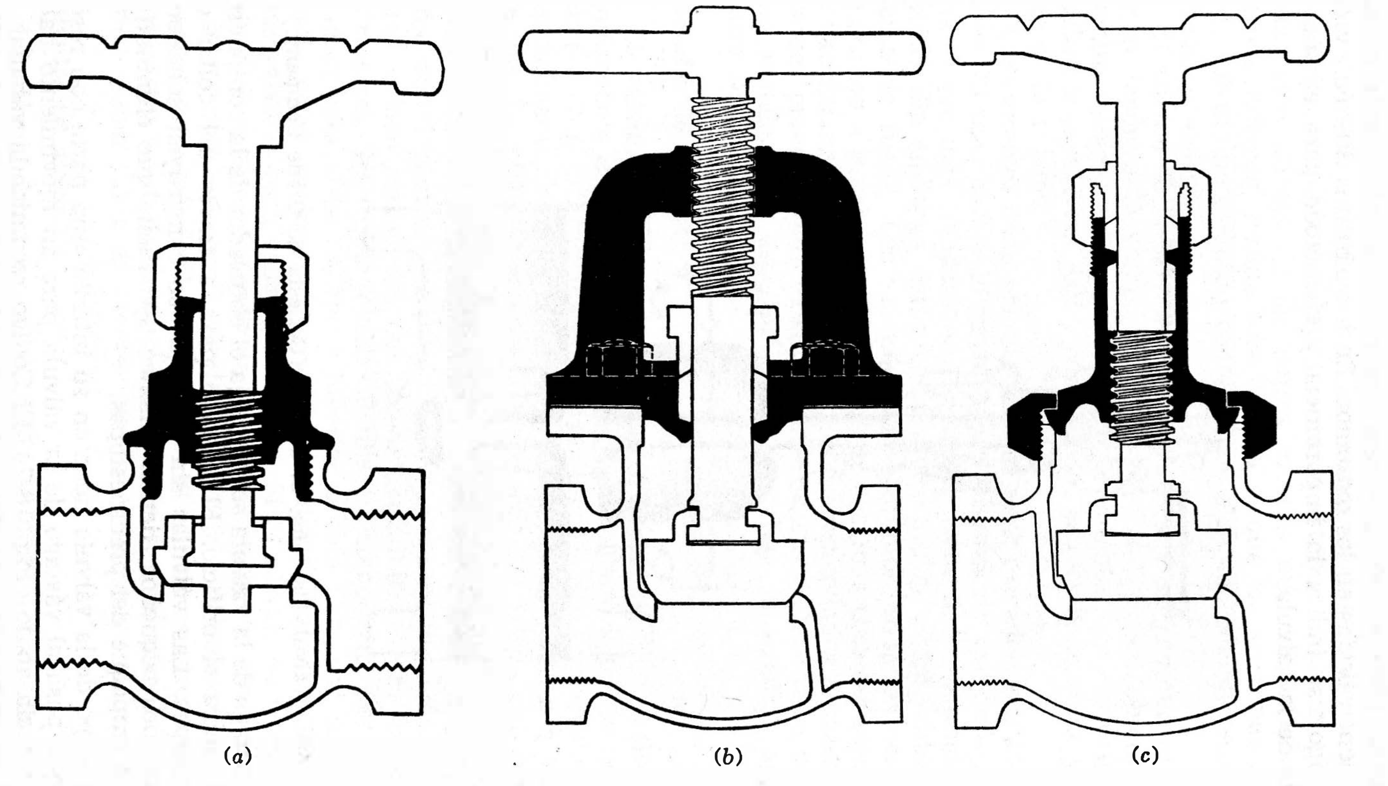


FIG 18-8. Diseños de cubiertas de válvulas. (*a*) Cubierta atornillada; (*b*) Cubierta bridada atornillada, vástago y horquilla exterior; (*c*) Cubierta de unión. (Cortesía de Wm. Powell Company.)

válvulas de globo como de compuerta. Por lo general, estas instalaciones tienen bridas en los extremos. En los párrafos 309 (*d*) y (*e*) del Código[48] se indica la importancia y el método para ajustar la cubierta de la válvula.

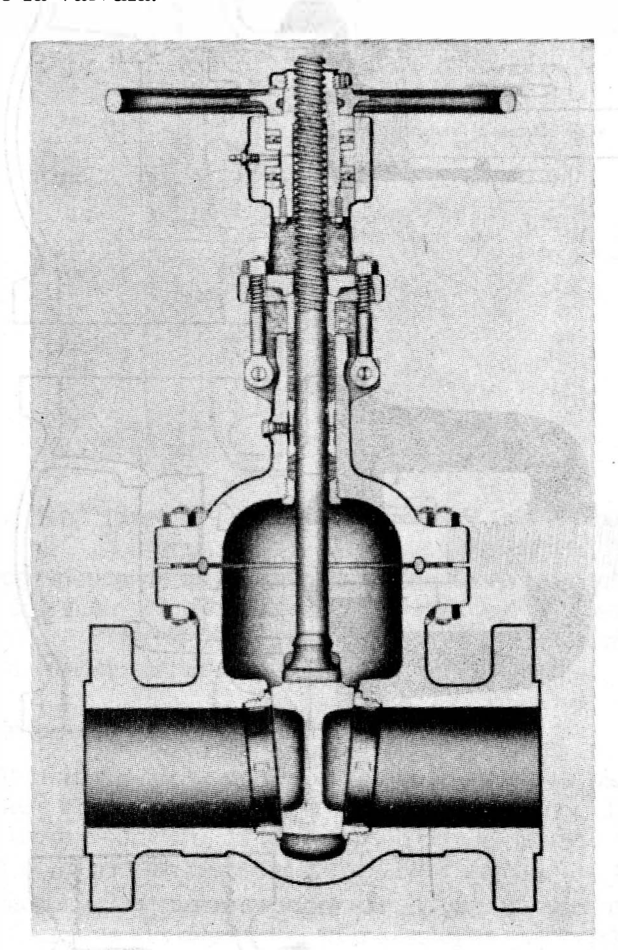


Fig. 18-9. Válvula de cuña, O. S. y Y. (Cortesía de Crane Company.)

El vástago de la válvula sube y baja el obturador de la compuerta, el cual cierra el orificio. El vástago pasa a través del collar del prensaestopas. Las válvulas sin empaque se construyen solamente para tamaños pequeños; tienen uniones tipo fuelle que eliminan el collar de empaque del prensaestopas.

El cuerpo de la válvula tiene en su interior una parte con rosca, por la que pasa al vástago de la válvula para su movimiento hacia arriba y hacia abajo (Fig. 18-7). El Código recomienda válvulas de tornillo exterior (Fig. 18-9) para tubos de 2½ plg o más. [Par.

(309) (1)]. El término O. S. y Y. se usa para describir a estas válvulas y con ello se indica tornillo exterior, vástago saliente y horquilla. En las válvulas con tornillos en el exterior se puede tener una observación directa de las partes móviles más importantes de la válvula. Además, resulta una ventaja el que las secciones roscadas de la válvula no estén en contacto con el fluido cuando se manejan fluidos corrosivos.

El asiento de la válvula es la porción del orificio que es cerrado por el tapón o la compuerta. Las válvulas pueden obtenerse con asientos integrales o con asientos de recambio. Los elementos principales de la válvula están constituidos por la compuerta y el vástago de la válvula.

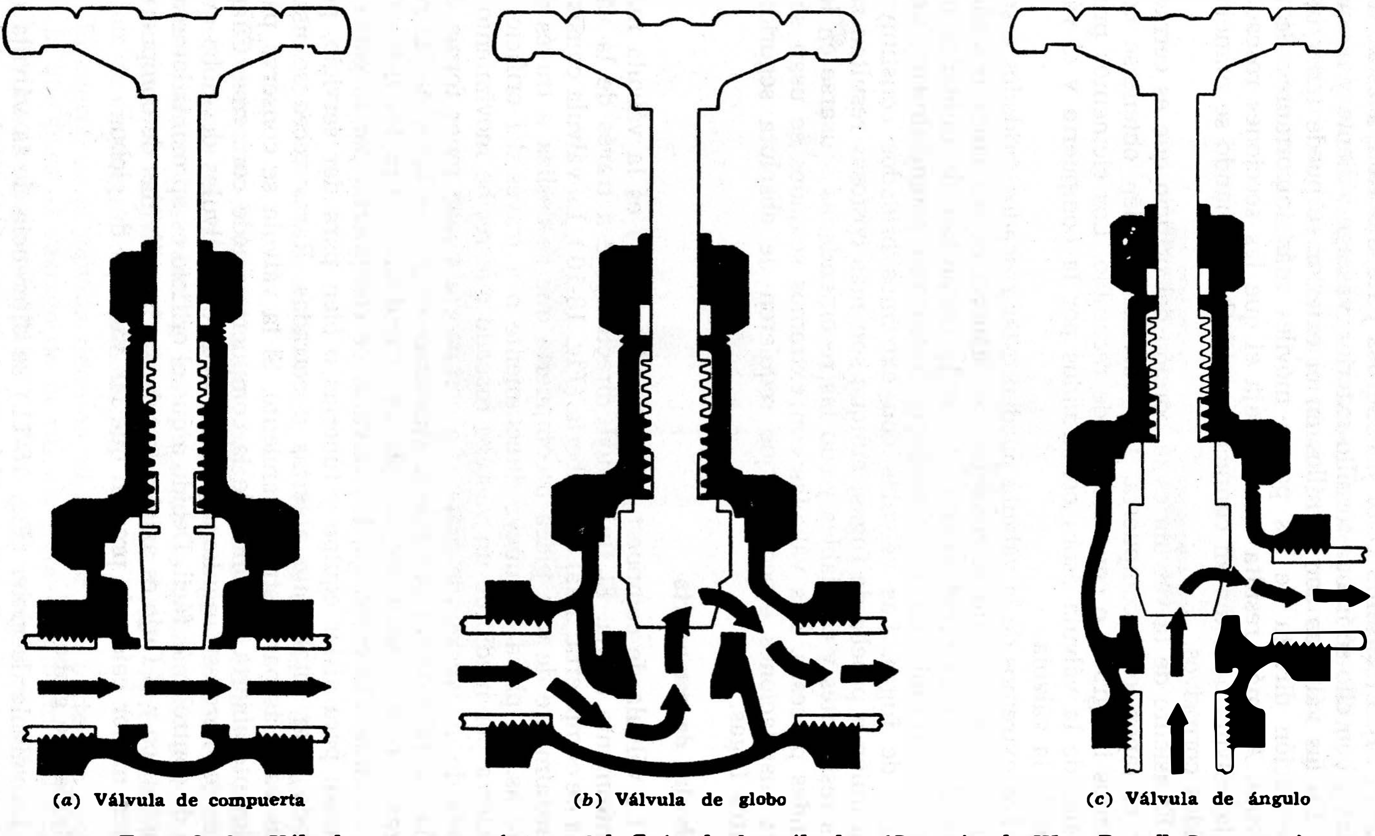
Los extremos de la válvula pueden estar roscados, bridados o soldados. El más barato lo constituye el sistema de extremos roscados y es el que más rápidamente se instala tratándose de unidades pequeñas. Sin embargo, éstas siempre constituyen potencialmente una fuente de fugas. Las válvulas con extremos bridados constituyen una unión a prueba de fugas; aunque son más costosas resultan ser más resistentes y confiables y son las recomendadas a usarse en los grandes procesos. Las válvulas con extremos soldados se usan sólo para instalaciones especiales que requieren de absoluta seguridad contra fugas.

Válvulas de compuerta

La válvula de compuerta (Figs. 18-7 y 18-9) es la válvula más comúnmente usada. El flujo fluye directamente a través de la válvula de compuerta, axial a la tubería (Fig. 18-10). La válvula consiste esencialmente de una placa o compuerta que se desliza a través de ranuras. La placa se mueve directamente o a través del orificio, y se cierra por medio de un vástago roscado que recibe movimiento a través de un volante de mano. La compuerta puede tener forma de cuña, de tal manera que pueda ajustarse contra los lados de las ranuras, o bien pueden ser dos placas extendidas contra los lados de las ranuras. Sin embargo, las válvulas de compuerta, por lo general se usan para aislar equipo y tuberías o bien para dar servicio, pudiendo estar totalmente abiertas o cerradas. Raras veces se usan estas válvulas para estrangulamiento. Si la válvula se conserva parcialmente abierta, el fondo de la compuerta puede corroerse. Cuando se requiere estrangulamiento, se recurre a válvulas de globo que son de control más fácil. Debido a que el orificio es aproximadamente concéntrico y el flujo es axial a la tubería, las válvulas de compuerta tienen menor caída de presión que las válvulas de globo.

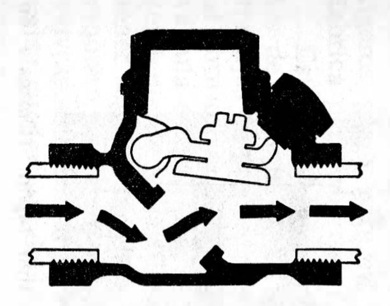
Válvulas de globo

La válvula de globo (Fig. 18-11) se diferencia de la válvula de compuerta en que el orificio de la primera es perpendicular o forma

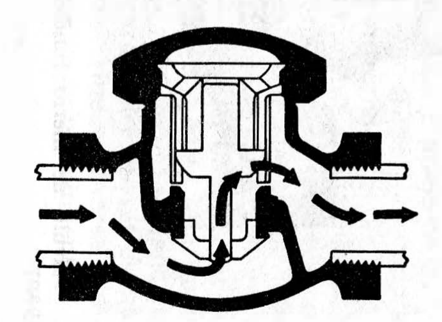


(*a*) Válvula de compuerta (*b*) Válvula de globo (*c*) Válvula de ángulo

FIG. 18-10. Válvulas y características del flujo de la válvula. (Cortesía de Wm. Powell Company.)



(*d*) Válvula de columpio



(*e*) Válvula horizontal de retención

(*f*) Válvula "Y"

FIG. 18-10. (Continuación)

un ángulo determinado con el eje del flujo. El cerrado de la válvula se efectúa mediante un volante sujeto al vástago, el que puede girarse para abrir o cerrar el orificio circular. El flujo que pasa a través de la válvula hace aproximadamente un ángulo de 270° para llegar hasta el orificio (Fig. 18-10). Después de haber pasado a través del orificio, gira aproximadamente otro ángulo de 270° para reentrar a la tubería del flujo original. Por lo tanto, la caída de la presión a través de la válvula de globo es mucho mayor que a través de la válvula de compuerta.

Se prefiere a las válvulas de globo para servicios de estrangulación, y siempre se les usa cuando se desea tener un cierre ajustado. Debido a que el asiento de la válvula de globo es de construcción

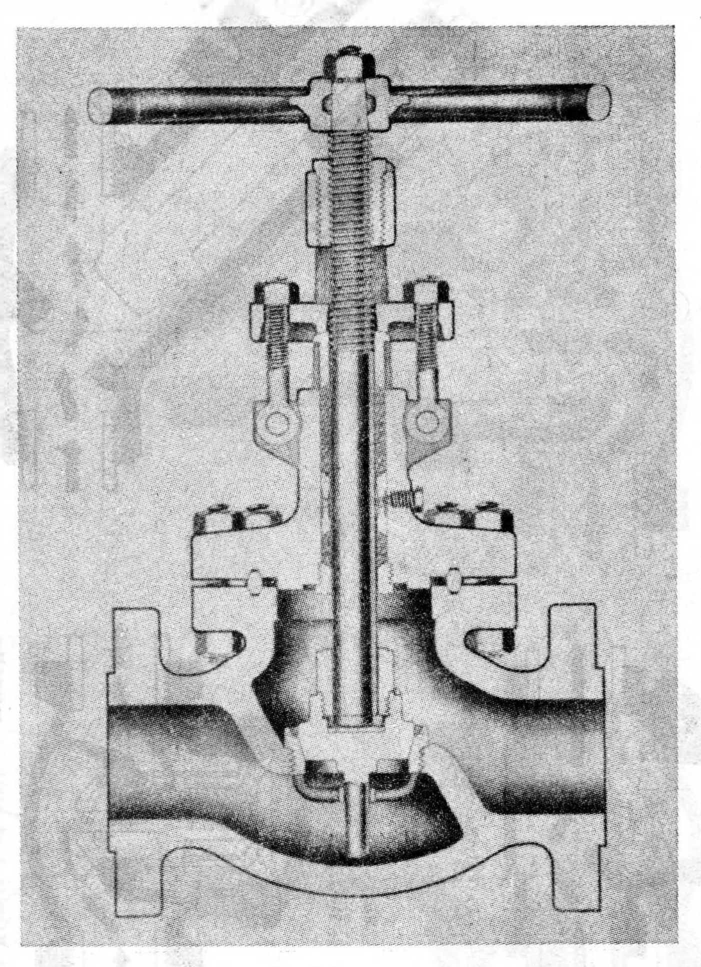


FIG. 18-11. Válvula de hierro fundido con disco tipo tapón. (Cortesía de Crane Company.)

circular, puede dársele mejor acabado que al de la válvula de compuerta.

Las válvulas de globo de tamaño grande son más caras que las válvulas de compuerta de tamaño semejante. Muchos consumidores compran solamente válvulas de globo para tamaño de 1 1/2 plg o menos; para estos tamaños es posible la estandarización a un simple tipo para todos los servicios.

La llamada válvula de ángulo (Fig. 18-10) es una válvula de globo, la cual ofrece menos resistencia que la válvula de globo convencional. Las funciones de la válvula de ángulo no lo son sólo como válvula, sino también como codo de 90° para tuberías. El flujo entra por el fondo de la válvula, sigue hacia arriba a través del orificio y gira un ángulo de 90° a través de la válvula para salir de la misma. Las válvulas de ángulo son muy usadas debido a que los esfuerzos en tubo flexionado resultan mayores que en tubo recto.

La válvula Y (Fig. 18-10) tiene características de estrangulamiento y tiene una área de flujo comparable a una válvula de compuerta.

Válvulas macho

Las válvulas macho (Fig. 18-12) constituyeron el primer tipo de válvula que se construyó. Originalmente se construyó con machos o espiras de madera. Su característica más importante continúa siendo su simplicidad. Cuando la válvula está abierta, el fluido fluye paralelo a la pared del tubo, pasando a través de un macho agujerado, del mismo tamaño que el orificio del cuerpo de la válvula. El flujo se corta al rotar el macho un ángulo de 90°, de tal modo que obstruye el orificio que se tiene en el macho. Ciertas válvulas macho tienen un orificio tipo venturi, de tal modo que la caída de presión es mucho menor que para cualquier otro tipo de válvula.

Las válvulas macho pueden obtenerse de materiales adecuados para temperaturas altas; han sido usadas para servicios hasta de 1 200°F. Se selecciona a esta válvula para manejo de hidrocarburos ligeros, gas, y para muchos servicios corrosivos, ya que la válvula se fabrica para casi todos los tipos de materiales.

Estas válvulas no son tan comúnmente usadas como las válvulas de compuerta. Algunos de los argumentos contra su uso en los trabajos de proceso son: (1) Posibilidad de que el macho se congele al abrirlo o cerrarlo; (2) no se tiene una evidencia visual de que la válvula esté abierta, como la que se tiene al observar el vástago ascendente de la válvula de compuerta; (3) deben lubricarse a fin de tener sellado completo;* (4) en las válvulas de tamaño pequeño se requiere de un soporte más rígido para poder operar el macho de la válvula. Sin embargo, muchas de las críticas adversas de estas válvulas pueden ser debidas a fallas en su mantenimiento.

* Se dispone de algunos diseños no lubricados.

TORNILLO LUBRICANTE
Inserte aquí el cartucho lubricante. El sistema siempre debe conservarse lleno, agregue cartuchos de lubricante cuando el tornillo esté en la posición inferior.

COLLAR TOPE

VASTAGO ROSCADO
No integrado con el macho. Sellado con lubricante.

INYECTOR DE EMPAQUE
El empaque se ajusta apretando el tornillo Allen. Puede insertarse a presión empaque adicional si ello es necesario.

CAMARA LUBRICANTE

RANURA PARA LUBRICAR
Ranura vertical en el macho

MACHO
No integrada con el vástago, por lo tanto debe estar balanceada si se tienen presiones altas.

TORNILLO PARA AJUSTE DEL SELLO
Empacado con empaque del vástago

CABEZA DEL TORNILLO DE AJUSTE DEL SELLO

LLAVE DE CUADRO

VALVULAS PARA RETENCION DEL LUBRICANTE
Cuatro bolas de retención para prevenir la fuga del lubricante.

RANURA ANULAR PARA EMPAQUE DEL VASTAGO

COMPENSADOR DE FLOTACION
Transmite par del vástago al macho.

CUERPO

SELLO, BALERO AXIAL DE BOLA

RANURA PARA LUBRICAR
Ranura vertical en el macho.

DIAFRAGMA METALICO
Sello hermético en el fondo de la válvula.

CUBIERTA RESORTE DE ACERO FORJADO
Mantiene tensión constante en el macho, conserva al macho en su asiento.

FIG. 18-12. Lubricación de válvulas macho de abertura rectangular. (Cortesía de Rockwell Mfg. Company, Nordstrom Division.)

Las válvulas modernas estan diseñadas para asegurar facilidad de movimiento y un sellado positivo. Por ejemplo, para la lubricación del macho se utiliza un lubricante semisólido que es inyectado hidráulicamente. Es posible levantar un poco el macho de la válvula al girar el tornillo para la inyección del lubricante, y esta acción obliga a lubricar al macho de la válvula. Las válvulas macho de tamaño grande disponen para su funcionamiento de un engrane y de un volante manual. Las válvulas de tamaño menor a 4 plg son operadas por una llave de palanca.

Valvulas de retención

Las válvulas de retención (Fig. 18-10) previenen el regreso del fluido a la tubería. Los dos mejores tipos de válvulas son la horizontal de retención y la de retención de columpio. La válvula horizontal de retención se proporciona con una bola o macho guiado, el que es levantado para permitir el paso del fluido en una sola dirección, y se regresa a su posición si el fluido fluyera en dirección de reversa. La válvula horizontal de retención es muy usada para tamaños de 2 plg o menos. Estas válvulas no exhiben gran tendencia a cerrarse de golpe y, por lo tanto, se pueden seleccionar para servicios irregulares o de flujo de inversión frecuente. Se instalan de tal modo que la dirección del levantamiento sea vertical.

Las válvulas de columpio son más frecuentemente usadas. Producen menos resistencia al flujo y se especifican para tamaños mayores de 2 plg. El cambio frecuente de la dirección del flujo causa rechinamiento en las válvulas de retención de columpio; esto puede disminuirse usando válvula equipada con una palanca exterior y un peso. La palanca se articula exteriormente. La posición del cuerpo que pende de la palanca puede cambiarse, con lo que puede variarse la sensibilidad de la palanca. De esta manera es factible evitar o reducir el rechinamiento y choque que se tendría trabajando con flujos de velocidad baja. La palanca exterior sirve también para liberar al disco cuando éste se atore.

Válvulas de control

Las válvulas de control son fundamentalmente similares a las válvulas de globo. Se fabrican de todos los materiales que se encuentran en las válvulas de globo; pero el asiento, el vástago y el cuerpo de estas válvulas tienen especificaciones de mejor calidad que las de las válvulas ordinarias.

La válvula de control de diafragma es la más utilizada. Se abre o se cierra a través de un vástago que está sujeto a una placa o diafragma que forma el lado móvil de una cámara (Fig. 18-13). La fuerza necesaria para dar movimiento en una determinada dirección, se obtiene a partir de la presión del aire que hay dentro de la cámara y por un resorte que se encuentra en la dirección opuesta.

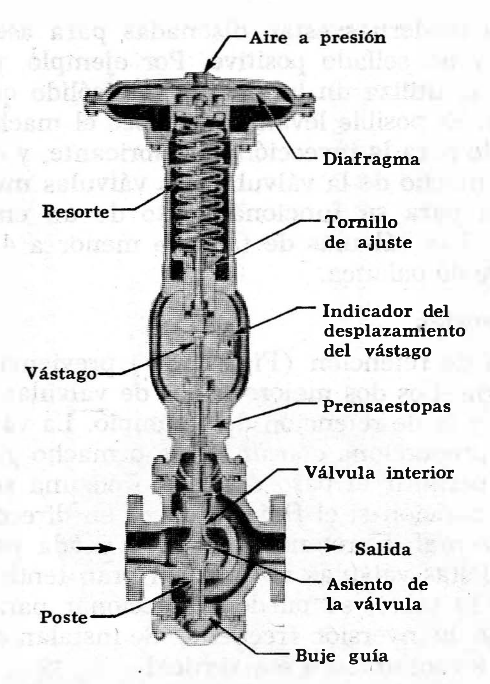


Fig. 18-13. Válvula de control de doble asiento operada con diafragma. (Cortesía de Fisher Governor Company.)

El movimiento del diafragma y, por lo tanto, el del vástago, causa el que se abra o se cierre el orificio de la válvula. La presión del aire en el diafragma es controlada por el instrumento sensible primario.

Las válvulas de control pueden obtenerse con doble asiento o de un solo asiento (véanse las Figs. 18-13 y 18-14). La válvula de doble asiento tiene dos orificios y la de simple asiento sólo uno.

Con la válvula de doble asiento se tiene un mejor control en el manejo de flujos grandes. Su principal ventaja es que la fuerza para mover el vástago es de valor muy pequeño. El diferencial de presión a través del asiento inferior es de valor opuesto y aproximadamente igual al que se tiene en el asiento superior, lo que permite que la fuerza para mover el vástago sea de valor mínimo.

La válvula de un solo asiento es más barata y su uso es adecuado para aquellos servicios de control que no sean críticos. Con ella se tiene un sello más ajustado que para las válvulas de doble asiento.

Se dispone de varios diseños del interior de la válvula. La válvula cuyo corte se muestra en la Fig. 18-4 está diseñada para obtener la capacidad máxima después de producirse un movimiento ligero en el vástago de la válvula. Esta característica es la más deseable para servicios de abertura y cierre fácil. El interior parabólico de la válvula de la Fig. 18-13 hace aumentar gradualmente el área de flujo

durante todo el tiempo en que ocurre el levantamiento del vástago, produciéndose, además, una excelente acción estranguladora. Se producen características similares con diseños interiores en forma de V.

Para trabajos de temperatura y presión altas, las válvulas de control tienen un dispositivo elevador llamado posicionador. Este dispositivo agrega o elimina aire del diafragma, lo que hace operar a la válvula, obligando a moverse al vástago hasta la posición precisa requerida por el instrumento de control.

Las válvulas de control se usan para control de la presión, así como para control de flujo. En muchos reguladores de presión se utiliza al fluido que está siendo controlado para que sirva como

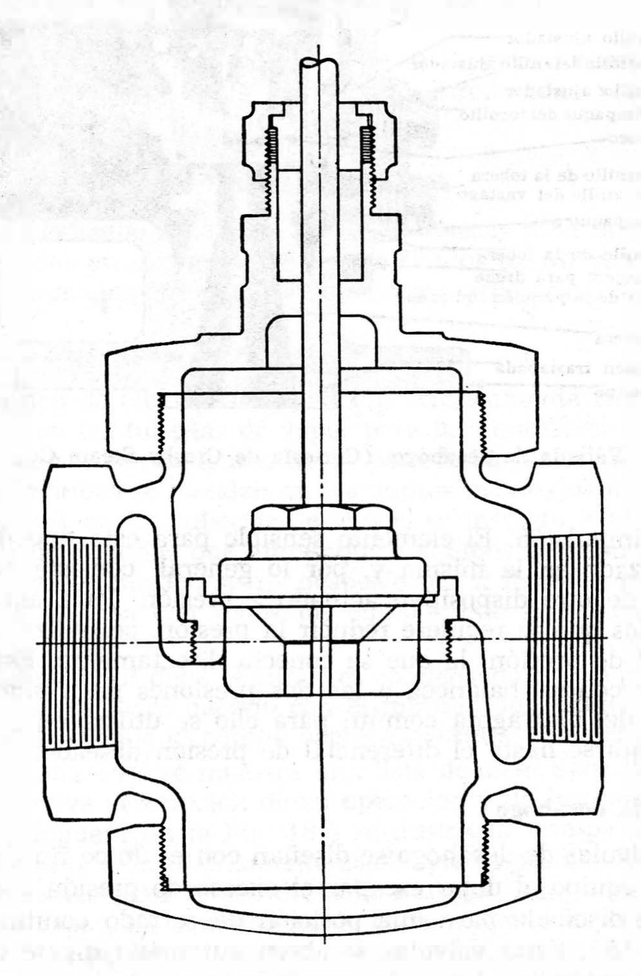


Fig. 18-14. Interior de una válvula de control de un asiento. (Cortesía de Fisher Governor Company.)

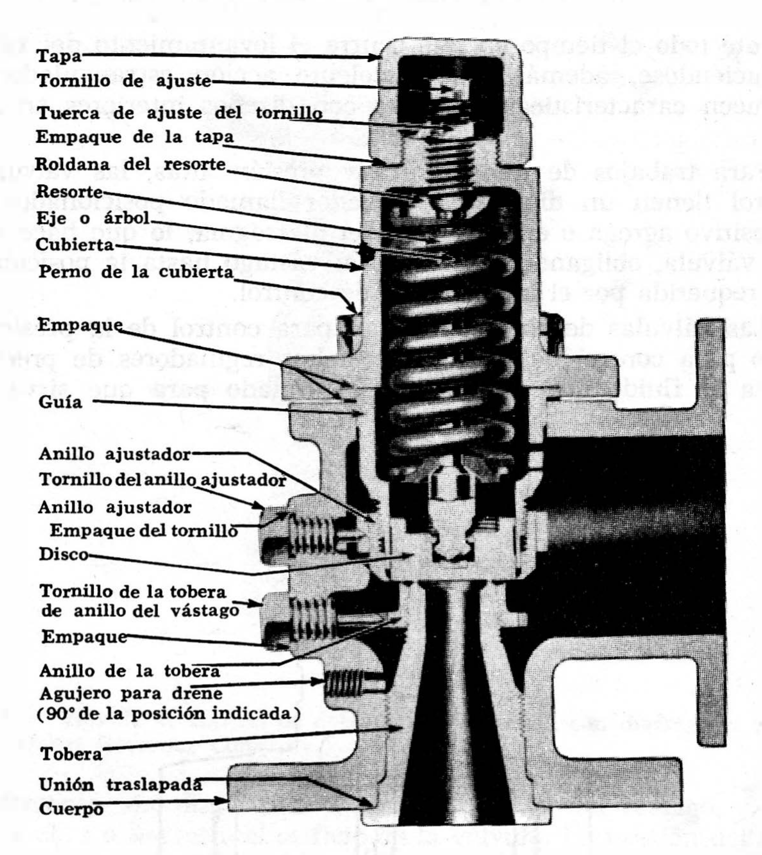


FIG. 18-15. Válvula de desahogo. (Cortesía de Crosby Steam Gage and Valve Company.)

medio de impulsión. El elemento sensible para este tipo de válvula está localizado en la misma y, por lo general, consiste de un diafragma o de otro dispositivo actuado a presión. Para aquellos servicios en los que se requiere reducir la presión, se utiliza la válvula diferencial de presión, la que se conecta directamente. Este tipo de válvula de control balancea a las dos presiones del fluido, una en cada lado del diafragma común; para ello se utiliza un resorte que puede ajustarse hasta el diferencial de presión deseado.

Válvulas de desahogo

Las válvulas de desahogo se diseñan con el único fin de dar protección al equipo al dejar escapar el exceso de presión y es la única válvula diseñada para una posición de cerrado continuo (véase la Fig. 18-15). Estas válvulas se abren automáticamente cuando la fuerza que actúa en el asiento excede a la que lo hace en el resorte. Estas válvulas deben construirse con los mejores materiales, ya

que son dispositivos de seguridad que protegen la vida y los objetos que están alrededor de la misma.

Las descripciones anteriores incluyen los tipos básicos de las válvulas que se fabrican. Sin embargo, hay muchas variaciones de cada uno de los tipos que se fabrican para servicios especiales. En un catálogo industrial general[22] se muestra una lista de más de 150 tipos específicos de válvulas para equipos de varios procesos. Cada uno de estos tipos puede obtenerse para diferentes materiales, y cada uno puede obtenerse en gran número de tamaños y clasificaciones de presión y temperatura. Existen más de veinte fabricantes de los tipos más comunes de válvulas y de artículos especiales. Hay competencia entre los diferentes fabricantes de válvulas de tipo común; cuyas especificaciones son controladas por las normas del fabricante o por los diferentes códigos.

Hay una publicación[10] que permite al ingeniero comparar sobre una base equivalente todas las válvulas producidas por los fabricantes.

ACCESORIOS VARIOS PARA TUBERIAS

Además del tubo necesario, válvulas y piezas para unión de tuberías empleadas en el transporte de los fluidos de un proceso, se requiere de otros elementos clasificados como accesorios.

Colector de condensado o trampas de vapor

La trampa de condensado, llamada erróneamente trampa de vapor, se usa en las tuberías de vapor para la eliminación del condensado formado a consecuencia de la pérdida de calor del vapor del agua. Las trampas se instalan en los puntos más bajos o en las cavidades que hay en las tuberías de vapor; se instalan a intervalos regulares en las tuberías que alimentan a equipos que son accionados con vapor, y que pueden sufrir desperfectos al llegarles condensado; también se les usa con todos los equipos que son calentados con vapor.

La trampa ideal debe eliminar el condensado y el aire que haya en la tubería y deberá hacerlo con el mínimo de pérdidas de vapor, y a velocidad tal que el equipo opere a máxima eficiencia.

En la Tabla 18-5 se muestra una lista de siete tipos de trampas. Se da una breve descripción de su operación y de las características que las distinguen. En la Fig. 18-6 se ilustra la trampa de cubo invertido que es la más ampliamente usada. No es posible dar recomendaciones exactas para el uso de cada trampa. Debe considerarse la presión del vapor, las condiciones de corrosión y la experiencia individual en cada planta.

Los fabricantes recomiendan el uso de sus trampas para los servicios más adecuados. Debe consultárseles para la selección de la

TABLA 18-5. CARACTERISTICAS DE LAS TRAMPAS DE VAPOR

	Operación	Características.
1. Cubo invertido	El vapor se acumula en el cubo invertido haciendo que éste flote por la acumulación interior. Con el movimiento de la palanca de la válvula que está sujeta al cubo se cierra la válvula de descarga. La entrada de más condensado causa que el cubo se sumerja, cerrándose así la válvula.	Es ligero y simple, pocas pérdidas de calor, debe protegérsele contra la congelación.
2. Cubo abierto	El cubo flota con un extremo abierto hacia arriba. El condensado llena al cubo causando que éste se sumerja y abra la válvula. La presión del vapor hace descargar el condensado hacia la tubería de descarga, causando de nuevo que flote el cubo sobre el resto del condensado.	Trabaja bien para cargas fluctuantes.
3. De pistón	Es una trampa de cubo invertido trabajando con una válvula piloto, la que a su vez hace trabajar a una válvula de pistón grande.	Se utiliza para capacidades altas (hasta 300 000 lb/hr)
4. Termostática	Válvula sujeta a fuelles que contienen líquido volátil. Al tenerse contacto del vapor con los fuelles, se aumenta la presión del fluido, lo que causa expansión en los fuelles y cierre del orificio de descarga.	No puede haber congelamiento. Se tiene ventilación muy rápida del aire y gran capacidad del condensado.
5. Expansión líquido	En principio es similar a la No. 4 excepto que se expansiona un líquido (aceite) para dar movimiento a la válvula.	No hay congelamiento. La descarga es continua para cualquier temperatura.
6. Flotador de bola	El condensado que se colecta en el cuerpo de la trampa causa la flotación de una bola conectada a la válvula de descarga, con lo que se logra cerrar la válvula.	La descarga del condesado es continua a la temperatura del vapor sin que haya choques.
7. Impulso	Una válvula está trabajando. El condensado, a o a casi la temperatura del vapor que se ha colectado en la cámara durante la descarga, hace que se incremente rápidamente la presión cerrando la válvula de descarga.	No puede haber congelamiento. Es muy pequeña y de poco peso. Alta capacidad para su tamaño.

trampa adecuada. Se han publicado muchas gráficas y procedimientos de diseño; su uso representa ahorro de tiempo ya que están basados en la experiencia que al respecto se ha tenido.

Al especificar las trampas para un proyecto determinado, por lo general se preparan dibujos de todas las trampas a usarse. Se elabora una lista en la que se incluyen detalles de la instalación de una o más trampas típicas, incluyendo los cálculos y los accesorios necesarios para cada tipo de instalación. También se dan números para identificación de materiales, presión y especificación del flujo. La lista se utiliza para (1) separar los materiales de todas las válvulas pequeñas y los accesorios necesarios para la instalación de la trampa; (2) para especificar operaciones; y (3) como una guía para la instalación. Los números de las trampas se usan para su identificación, tanto para los dibujos de la tubería como para su almacenaje y erección.

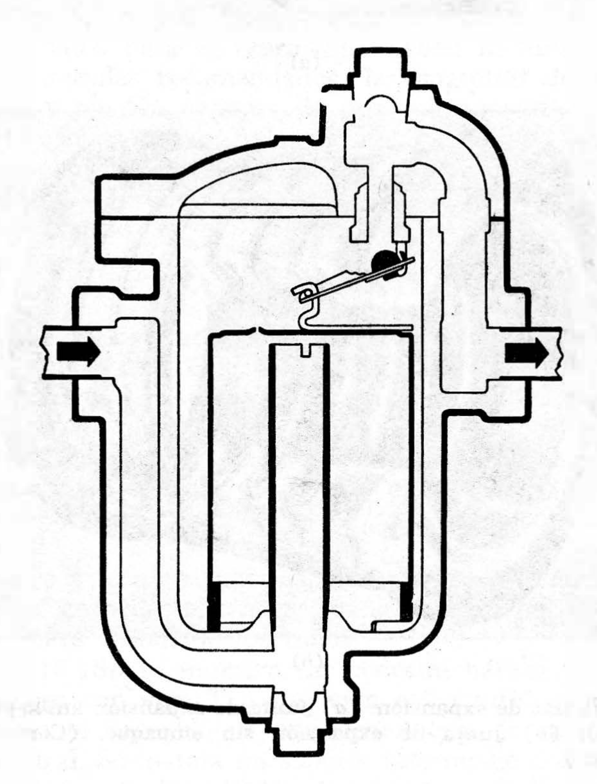
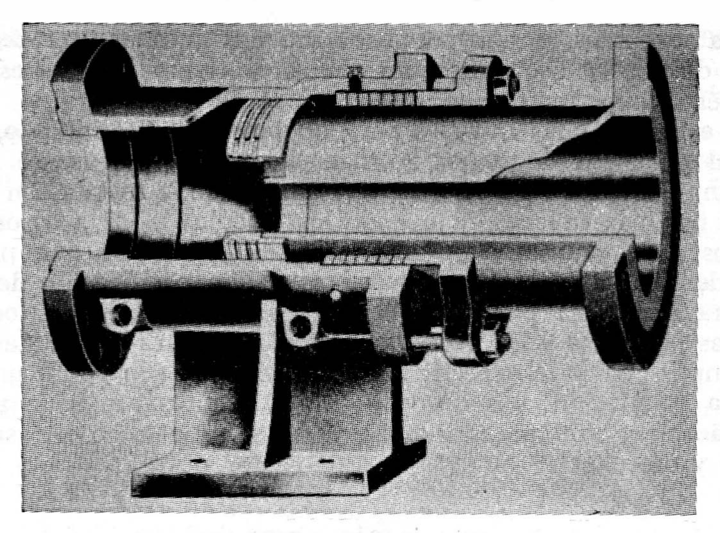


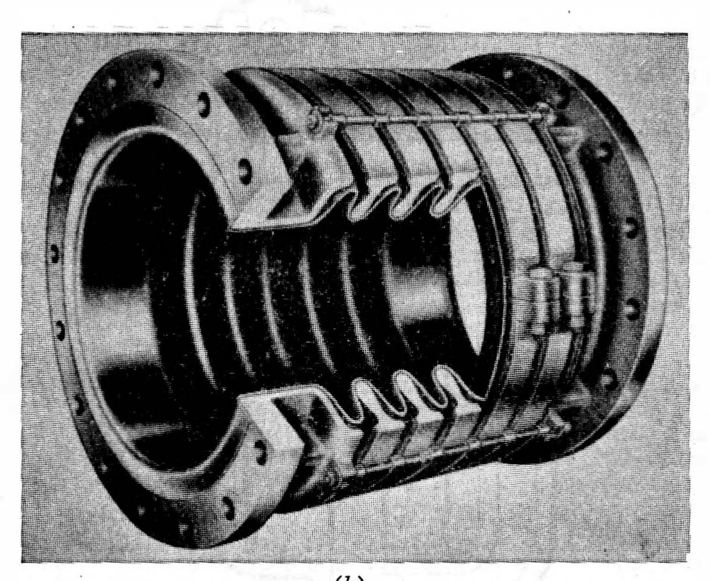
Fig. 18-16. Trampa de cubo invertido. (Cortesía de Armstrong Machine Works.)

Juntas de expansión

Las juntas de expansión se utilizan para la reducción o eliminación de esfuerzos, y para absorber el exceso de vibraciones. En la



(*a*)



(*b*)

FIG. 18-17. **Juntas de expansión. (*a*) Junta de expansión anillo-pistón (guiada internamente); (*b*) Junta de expansión sin empaque. (Cortesía de Adsco Industries, Inc.)**

Fig. 18-17 se muestran dos ejemplos de los tipos comunes de juntas de expansión, la junta corrediza y la junta sin empaque. Cada uno de estos tipos de juntas se hace de una gran variedad de estilos y materiales, de acuerdo a las necesidades. La junta corrediza tiene prensaestopas en prevención de las fugas que puedan ocurrir; por

lo tanto, requiere de más mantenimiento que la junta corrugada sin empaque. La junta corrediza simplifica los cálculos de expansión por ser fija la longitud de su trayectoria.

Deben especificarse e investigarse cuidadosamente la presión, temperatura y movimiento en cada junta de expansión. Las especificaciones deben incluir la descripción del fluido, presión máxima, temperatura máxima, posición al no haber expansión, dimensiones sin expansión, posición al haber expansión, dimensiones con la expansión, deformaciones axiales y ciclo estimado del periodo de expansiones.

Si se van a instalar varias juntas de expansión, el trabajo se facilitará al proporcionarse dibujos que muestren en dos o más vistas los diferentes tipos de juntas de expansión necesarias. En los dibujos se indica la junta por su número, así como también los datos de operación. Usando estos dibujos, el fabricante podrá preparar sus cotizaciones con un mínimo de información escrita.

Entre los datos para el fabricante, deben incluirse el tipo de junta y los materiales recomendados, la magnitud de las fuerzas de compresión y tensión capaces de producir movimientos axiales, tanto para el caso de expansión como de acortamientos, y la magnitud de las fuerzas longitudinales causadas por la presión interna. Todos estos datos deberán ponerse junto con la lista de las juntas de expansión para usarlos en el análisis de esfuerzos.

Suspendido de tuberías y soportes

En las primeras instalaciones de tuberías de procesos, casi todas las tuberías se instalaban colgadas utilizando abrazaderas sujetadas por varillas o cadenas; esto se hacía para tener libertad de movimiento. Este método de soporte se sigue todavía utilizando en tuberías que se instalan dentro de los edificios. Sin embargo, en las plantas de proceso modernas, casi todo el equipo se coloca en el exterior y las tuberías se colocan sobre soportes estructurales de acero (Fig. 18-18*a*).

La tubería se coloca en soportes. Resulta fácil sostener los tubos en estructuras o en pedestales sobre los que se apoyan directamente los elementos para sostén de los tubos.

En la Fig. 18-18*b* se muestra un pedestal barato y simple que puede construirse con viga T o con viga estructural común H o I. No es necesario ni deseable sujetar firmemente la tubería a cada soporte estructural. Se instala un soporte intermedio con guías como el que se muestra en la Fig. 18-18*c*; esto se hace cada tres o cuatro soportes, según sea el tamaño de la tubería. La guía permite movimiento en una dirección fija. En la Fig. 18-18*d* se muestra un método muy sencillo para restringir el movimiento vertical. Los pedestales, anclas y guías fabricados en la obra, por lo general resultan ser más baratos que los que se compran ya hechos. Sin embargo,

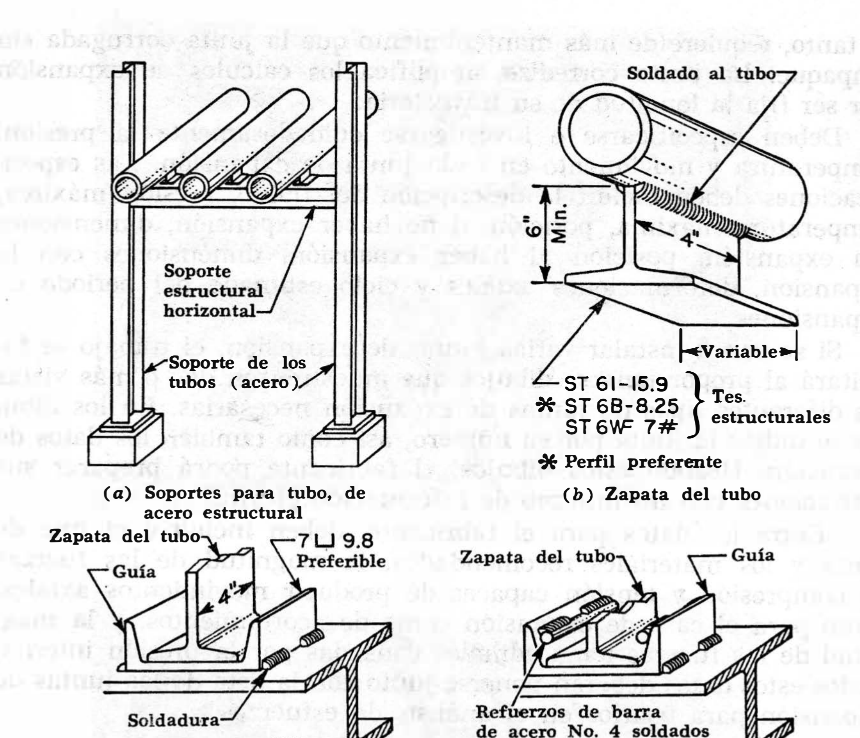


FIG. 18-18. Soportes y anclas para tubos.

los soportes y colgantes que se muestran en la Fig. 18-19 son más baratos que los hechos en la obra.

Los soportes colgantes son de uso más apropiado para soportar tuberías en el interior de los edificios. Sin embargo, se usan miembros estructurales en el interior de los edificios cuando hay varias tuberías dispuestas de lado a lado. Los pedestales fabricados en la obra se usan de preferencia para soportar instalaciones exteriores, debido a que son fáciles de instalar y pueden protegerse contra la corrosión, pintando todas las superficies exteriores.

Los soportes colgantes de resorte, como el mostrado en la Fig. 18-20, se usan en instalaciones de tuberías para alta temperatura, tanto para el interior como para el exterior de los edificios. Estos son los más baratos y es el tipo de soporte flexible más seguro para sustentación de tubos.

En el diseño de los soportes del tubo, es común y práctico especificar la elevación del lecho del tubo para todos los tubos coloca-

dos a la misma elevación relativa. La palabra elevación se usa intencionalmente, ya que la dirección es referida desde el lecho del tubo al nivel de referencia. Por ejemplo, cuando en un dibujo se muestra 125, este número indica que la tubería está 25 pies sobre



FIG. 18-19. Soportes y colgantes para tubos. (Cortesía de Elcen Metal Products Company.)

el nivel de referencia nominal del área especificada arbitrariamente y, por conveniencia, como 100 pies.

Al instalarse todos los tubos a una elevación fija del lecho del tubo, prácticamente todos los pedestales, excepto las guías, tendrán la misma altura, lo que simplifica grandemente la instalación. Además, con una elevación constante se fija la posición del miembro estructural horizontal de los tubos, lo que simplifica el diseño y la construcción.

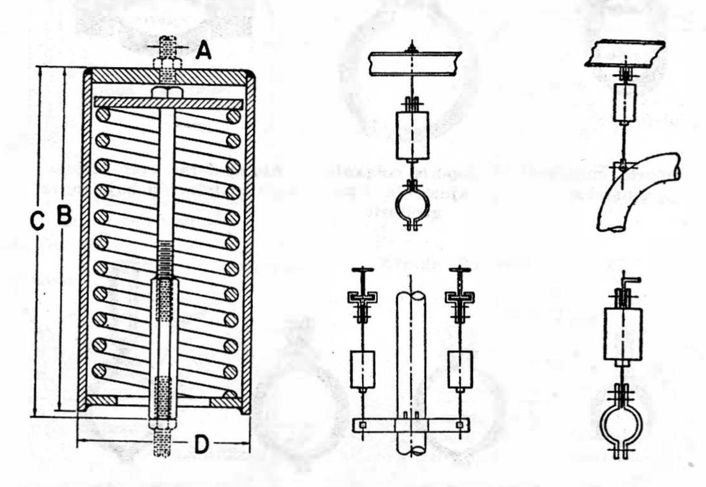


Fig. 18-20. Soporte colgante de resorte e instalaciones típicas. (Cortesía de Elcen Metal Products Company.)

Cortadores de flujo manufacturados

El cortador de flujo manufacturado (Fig. 18-21) se usa para sellar un tubo o una pieza de algún equipo. Proporciona un sello más positivo y confiable que el obtenido con una válvula convencional, y su uso es muy valioso cuando se necesita, para fines de mantenimiento, aislar una parte del sistema de operación.

Es más costoso, pero su uso es más conveniente que el cortador convencional o cortador con figura de un 8, que es una placa metálica que tiene la figura de un 8 con un agujero del tamaño del tubo en uno de los lados del 8. El tubo se sella al instalar entre las bridas la posición sólida de la placa. Después se completa el trabajo desatornillando parcialmente las bridas para separarlas y dar lugar al drenado del tubo. Con los cortadores de línea fabricados, la tubería se sella mediante la manipulación de palancas a través de un volante de mano. La placa es colocada en la posición deseada por medio de una masa movible, la que es controlada por el volante de tornillo de gusano operado a mano y un engrane anillo.

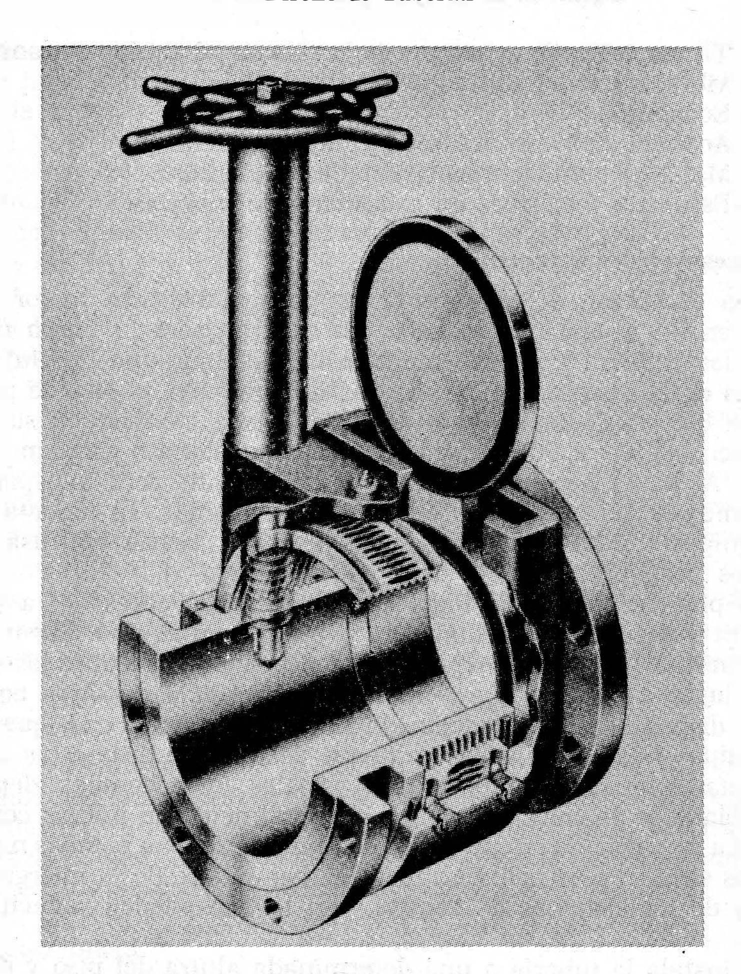


FIG. 18-21. Cortadores de flujo. (Cortesía de Hamer Valves, Inc.)

Otros accesorios

Hay una gran variedad de accesorios adicionales y de equipo usado especialmente en tuberías. Deben estudiarse los catálogos de los fabricantes[7, 31] para tener una descripción completa de ellos.

TRAZADO DE LA TUBERIA Y DISPOSICION DE LA MISMA

Para el trazado inicial de la disposición de la tubería de una planta de proceso, el diseñador tiene que considerar los siguientes seis problemas.

1. Necesidades del proceso.

2. Transmisión de esfuerzos de la tubería al equipo y transferencia de vibraciones del equipo a la tubería.
3. Economía.
4. Accesibilidad en cuanto a funcionamiento.
5. Mantenimiento y reposición de elementos.
6. Esfuerzos excesivos en el sistema de tuberías.

1. Necesidades del proceso

Con excepción de algunos casos particulares,* la mejor disposición en un sistema de tuberías no siempre será la unión directa entre dos equipos, como se muestra en un diagrama de flujo. Los análisis de la instalación de tuberías de cualquier planta de proceso indican que es necesario que la tubería tenga cambios en su dirección, con vueltas a 90° ya sea en el mismo plano o en planos diferentes. Al haber muchas tuberías en una planta, será indispensable tener muy ordenada la disposición de las mismas. El tener a todos los equipos unidos con un solo tubo recto, crearía confusiones y arreglos poco prácticos.

La planeación que se haga deberá ser muy accesible, a fin de poder proporcionar mantenimiento y limpieza al equipo. Por motivos de seguridad hay ciertos equipos que deben estar localizados en un cierto lugar específico o a determinada distancia de otros equipos.

La disposición más sencilla de tuberías es aquella en que todos los equipos están instalados en hileras paralelas o dispuestas en forma rectangular. Los equipos similares tales como bombas, depósitos o cambiadores de calor, se agrupan generalmente en hileras consecutivas. La localización en grupos de equipos tales como bombas o demás equipos similares, simplifica mucho el suministro de la energía eléctrica y de los sistemas de control, con lo que pueden reducirse los costos.

Se instala la tubería a una determinada altura del piso y por encima de los equipos con objeto de proveerle suficiente espacio alrededor del mismo.

Es muy común agrupar las tuberías de modo que queden paralelas y que vayan por una orilla a la misma elevación, y con los mismos cambios de elevación al haber un cambio en la dirección. De esta manera se puede dejar suficiente espacio para hacer conexiones entre hileras sucesivas de tuberías, a diferentes alturas, y también para facilitar la labor de mantenimiento. Debe tenerse cuidado y evitar cambios elevados que puedan dar lugar a la formación de cavidades en los que pueda acumularse el líquido.

2. Transmisión de esfuerzos y vibraciones

La transmisión de esfuerzo de la tubería al equipo puede evitarse instalándose juntas de expansión en las tuberías que conducen

* Caso particular definido por el proceso.

vapor, o en las conexiones del escape de las turbinas, o de algún otro equipo impulsado a vapor. Sin embargo, el uso de las juntas mecánicas de expansión está limitado por las posibilidades de corrosión, erosión y esfuerzos cíclicos que se presentan en algunos servicios del proceso. Por estas razones, el diseñador de tuberías debe intentar eliminar los esfuerzos mediante una disposición adecuada de los tubos, y mediante el uso de soportes y anclajes.

Hay dos razones para eliminar los esfuerzos en una tubería. Una de ellas es evitar tener esfuerzos excesivos en el equipo en las válvulas a las que está sujeta la tubería, y la otra es prevenir un mal alineamiento de las partes del equipo, originado por los movimientos que se producen. Los fabricantes del equipo no reconocen ninguna garantía si las fallas del equipo fueron producidas por fuerzas externas.

Se encuentran vibraciones en la tubería cuando está conectada a maquinaria en movimiento. Casi toda la vibración cíclica podrá eliminarse con el uso adecuado de soportes y amortiguadores. Las vibraciones de alta frecuencia causadas por maquinaria de alta velocidad, como por compresores centrífugos, pueden absorberse utilizando soportes fijos. La localización correcta de estos soportes se determina experimentalmente estando la maquinaria en operación.

3. Economía

El costo se ve afectado de acuerdo a las necesidades del proceso; sin embargo, las personas encargadas del diseño deberán evitar el uso indebido de accesorios y soportes. No hay reglas precisas para cada diseño, pero se obtendrá mayor economía por las simplificaciones en las especificaciones de la tubería.

4. Accesibilidad

Las válvulas y los demás elementos que se usan en las tuberías, requieren de mantenimiento periódico y deben, por lo mismo, localizarse en una posición conveniente. Su localización puede ser a nivel del piso o adyacentes a alguna plataforma.

5. Mantenimiento y reposición

El mantenimiento y la reposición de tubería, por lo general no son problemáticos, a excepción de las tuberías que conducen materiales corrosivos o erosivos. Las tuberías de acero al carbono o de aleaciones de acero, por lo general tienen una vida de muchos años y en el diseño ordinariamente no se considera la reposición de tramos largos de tubos del sistema. Sin embargo, si en particular hay alguna pieza de la tubería que esté expuesta a condiciones extremas de corrosión o erosión, deberá instalarse de modo que su reposición sea fácil.

6. Esfuerzos en tuberías

Tipo de esfuerzos

Fundamentalmente, el análisis de esfuerzos que se hace en todos los sistemas de tuberías es originado por los cambios de temperatura. Ordinariamente hay tres condiciones que causan los esfuerzos en la tubería. Estas son: primera, el esfuerzo causado por la presión interna o externa que actúa en la pared del tubo; segunda, los esfuerzos remanentes del tubo, después de su fabricación o erección; y tercera, los esfuerzos causados por los cambios de temperatura producidos por el fluido que está circulando, o por cambios en las condiciones exteriores.

Para seleccionar un diseño seguro que resista la primera de las condiciones, deberá especificarse el tubo adecuado y el espesor del mismo de acuerdo a las reglas del Código. La segunda condición puede eliminarse por relevación de esfuerzos y fabricación apropiada. La tercera condición es más intangible ya que aun cuando puede ser anticipada, no puede evaluarse en forma precisa mediante un simple análisis.

Magnitud de los esfuerzos originados por la temperatura

El esfuerzo que se origina en un tubo de acero con extremos rígidamente fijos y para un incremento de temperatura de 1°F, es aproximadamente de 195 lb/plg² ($S = ECT$ donde E=módulo de elasticidad, C-= coeficiente de expansión y T = cambio de temperatura en °F). La magnitud de las posibles fuerzas longitudinales causadas por un cambio de temperatura de un grado, serán de diferente valor según sea el tamaño del tubo. Así para tubo de 1 plg cédula 40, la fuerza valdrá $S \times$ área de la sección transversal metálica, o valor de 96.33 lb; para tubo de 4 plg, cédula 40, la fuerza resultante es de 618 lb; y para tubo de 12 plg, cédula 40, de 3069 lb.

En las tuberías de proceso, los cambios de temperatura son, por lo general, de varios cientos de grados. Para un cambio de 100°F, las fuerzas anteriores son aproximadamente de 5, 30 y 150 ton, respectivamente. Sin embargo, estas fuerzas actuarían solamente para el caso de que se tuvieran restricciones en el movimiento de los extremos del tubo, y que éste permaneciera rígido en su posición de frío y durante el calentamiento del mismo. Aun bajo estas condiciones, si los esfuerzos llegasen al punto de cedencia del material, inmediatamente resultaría algo de condición plástica, lo que ayudaría al sistema de esfuerzos. Algunos especialistas creen que esta relevación de esfuerzos ocurre en casi todos los sistemas de tuberías de acero al carbono altamente esforzadas. En otras palabras, el deslizamiento normal o de deformación, por lo general releva al sistema con una subsecuente reducción de los esfuerzos.

Métodos para relevación de esfuerzos por expansión

Deben procurarse algunos medios para eliminar, o bien reducir, los esfuerzos transmitidos por las tuberías al equipo y que son originados por los cambios de temperatura. El sistema de tuberías debe ser flexible, de tal modo que en él mismo pueda relevarse una gran parte de los esfuerzos. Esto se consigue con una disposición flexible en la colocación de los tubos o con el uso de juntas de expansión o por pretensado en frío.

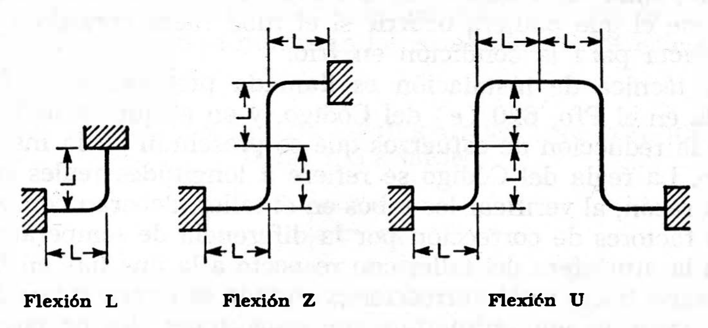


FIG. 18-22. Flexiones de expansión comunes.

Flexibilidad de acuerdo al trazado de la tubería

Los tubos raramente se conectan en línea directa desde un punto fijo a otro punto fijo. El sistema se vuelve más flexible cada vez que un tubo cambia de dirección, ya que se tiene libertad de movimiento en el punto donde se efectúa el cambio de dirección. Más que confiarse, es conveniente planear el trazo de la tubería teniendo en mente el problema de la expansión. En la Fig. 18-22 se muestran varias flexiones que le dan flexibilidad a la tubería. Los esquemas están arreglados de izquierda a derecha en orden de aumento de flexibilidad; cada una de las flexiones tiene la misma longitud de brazo *L*. Estas flexiones están en un solo plano. La flexibilidad se mejora al ocurrir flexiones en más de un plano.

JUNTAS DE EXPANSIÓN

Una junta de expansión instalada en tubo recto o en un tubo con ambos extremos firmemente anclados, absorberá los esfuerzos desarrollados por la expansión. La junta conecta a dos secciones del tubo, igual que un acoplamiento, pero permite libertad de movimiento.

Las juntas de expansión manufacturadas no son muy utilizadas en las tuberías de las plantas de proceso. Se utilizan en aquellas aplicaciones en que el tamaño de los tubos o las limitaciones del espacio no se presten a cambios de configuraciones, o bien que éstas resulten muy costosas.

Pretensado en frío

Las fuerzas generadas por la expansión son causadas por el movimiento de los tubos, originado por los cambios de temperatura atmosférica o de operación. Un método para disminuir la intensidad final de los esfuerzos en la condición de caliente, consiste en cortar el tubo a una longitud menor y colocarlo en su posición mientras está en frío. Este acortamiento produce en el tubo un esfuerzo de tensión inicial, que cambia a esfuerzo de compresión para la condición expandida en caliente. El esfuerzo resultante tiene un valor menor que el que pudiera ocurrir si el tubo fuera cortado a la longitud exacta para la condición en frío.

Esta técnica de instalación es llamada pretensado en frío. Es discutida en el Pfo. 620 (*e*) del Código, y en el que se define el límite de la reducción de esfuerzos que se presentan en la instalación del tubo. La regla del Código se refiere a longitudes reales erigidas. Por esta razón, al verificar los tubos en el taller, deberán considerarse algunos factores de corrección por la diferencia de temperatura que haya en la atmósfera del taller con respecto a la que hay en la obra. Es necesario hacer estas correcciones cuando se tienen tubos de aleación de acero, ya que ordinariamente estos materiales no pueden retrabajarse en el lugar de la obra. Cuando se aplica el pretensado en frío, deben determinarse las dimensiones reales que hay en el lugar de la obra.

Cálculo de los esfuerzos debidos a la expansión

El código de tuberías establece el valor del esfuerzo máximo admisible, según sea el valor de la temperatura y las especificaciones del material del tubo. En el Cap. 3 de la Sec. 6 del Código se incluyen los Pfos. 618 a 620 inclusive, los que contienen varias reglas, limitaciones y requerimientos para el cálculo de los esfuerzos en tuberías. En una parte del Pfo. 620 (*a*) se lee, "son necesarios los cálculos formales únicamente donde existan dudas razonables de la flexibilidad adecuada del sistema".

En el Código no se exponen los sistemas para analizar los esfuerzos en una tubería; sus funciones son más bien como una guía práctica, y no como un instrumento que cubra con detalle todas las condiciones posibles del diseño de tuberías. La responsabilidad para la interpretación y aplicación adecuada de las reglas recae en el diseñador.

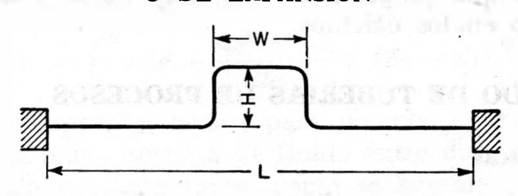
Los métodos de análisis de esfuerzos* son extremadamente rigurosos y, por lo mismo, su cálculo consume mucho tiempo, resultando esto muy costoso. Existen varios métodos rápidos para evaluar los esfuerzos, los que utilizan giáficas.[18,34] Sin embargo, estos mé-

* Se ha desarrollado un método que es adaptable a máquinas computadoras de alta velocidad.[35] Esta referencia también es una fuente de información relativa a problemas de flexibilidad de tuberías.

todos simplificados no son totalmente aceptados por los diseñadores. Aun en los cálculos más rigurosos o formales se depende de las suposiciones que se hagan, algunas de las cuales son reconocidamente dudosas. Por lo tanto, es de esperar tener algunas equivocaciones, independientemente del método usado; el grado de aumento en el error será mayor utilizando los métodos más simplificados. Es deseable que el error sea favorable para tener mayor seguridad, pero esto sólo dentro de los límites económicos aceptables y que permita tener la configuración deseada de la tubería.

A fin de ilustrar la variación de los esfuerzos con la configuración, en la Tabla 18-6 se muestran los resultados de los cálculos para una U de expansión.

TABLA 18-6. VARIACION DE LOS ESFUERZOS EN UNA CONFIGURACION U DE EXPANSION



Caso	Longitud en pies *L*	*H*	*W*	Esfuerzo lb/plg²	Longitud total (L + 2H) en pies
1.	200	10	20	20 990	220
2.	200	11	20	18 544	222
3.	200	11	21	18 077	222
4.	200	12	20	16 738	224

Bases

(a) Tubo de 6 plg, cédula 80, API-5L, grado C.
(b) Temperatura de operación 600°F, presión manométrica 250 lb/plg².
(c) Esfuerzo admisible = 19 300 lb/plg².
(d) Expansión máxima a 70°F, 4.72 plg/100 pies.
(e) Pretensado máximo admisible, lo estipulado por el Código.
(f) Flexiones a 90°, soldadas a tope, codos de radio largo.
(g) Por simplificación no se consideraron las guías, aunque para estas flexiones se requiere su uso.

El caso 1 muestra un valor *S* de 20 990 lb/plg², lo que excede el valor admisible 19 300 en 1 690 lb/plg². En los casos 2 y 3 hay esfuerzos menores que el admisible, teniéndose un aumento de un pie en el valor de *H* y un aumento de un pie en el valor de *W* para el caso 3. En el caso 4 se tiene una disminución del esfuerzo de valor 4 200 lb/plg² por haber un aumento de 2 pies en el valor de *H*.

Los cambios en la longitud del tubo causan un aumento en el costo del material, de valor aproximado a $ 6.00 para los casos 2 y 3 y de $ 12.00 para el caso 4. El costo total de toda la instalación es del orden de $ 2 000.00. El incremento al costo es de menos de

1/2 a 1% para los casos 2 y 3 y menor a 1% para el 4. Ya que los costos por diseños son aproximadamente de $ 5.00 por hora-hombre (incluyendo costos de ingeniería, dibujos y administración), es muy poco el ahorro que puede lograrse en problemas tan sencillos como éste.

Los diseñadores, por lo general, utilizan gráficas para calcular los esfuerzos en flexiones U simples, de tal manera que se puede determinar fácilmente la configuración más adecuada. En la Ref. 18 se incluye una tabulación que da la exactitud relativa de los diferentes métodos aplicados a diez configuraciones. Se recomienda estudiar esta tabla en todos sus detalles.

Las Ref. 2, 18 y 34 se recomiendan particularmente para aquellos que estén interesados en los diferentes métodos de análisis de esfuerzos. La Ref. 18 no tiene completas todas las configuraciones, pero las tablas que proporciona son muy útiles y ahorran mucho tiempo efectivo en los cálculos.

DIMENSIONADO DE TUBERIAS DE PROCESOS

Ecuaciones básicas

El balance de energías es básico para todos los problemas de flujo de fluidos, y es de utilidad para recordar los principios de la primera ley de la termodinámica. Esta ley establece que la cantidad total de energía que llega a un sistema debe ser igual a la cantidad que sale del mismo. La expresión de la primera ley, despreciando la energía de superficie, magnética y eléctrica, escrita en forma diferencial para flujo de una libra de fluido, es la siguiente:

$$dU' + d(Pv) + \frac{du^2}{2g_c} + dZ\frac{g}{g_c} = dq - dW \tag{1}$$

donde U' = energía interna por libra de fluido
P = presión, #/pie²
v = volumen específico, pies³/lb
u = velocidad, pies/seg
Z = altura con respecto a un plano de referencia, pies
g = aceleración debida a la gravedad, pies/seg²
g_c = factor para convertir poundales a libras de fuerza, lb-pie/#-seg²*
q = calor agregado al sistema, Btu/lb
W = trabajo hecho por el sistema, pies-#/lb*

A la expresión Pv se le llama trabajo del flujo y representa la cantidad de energía necesaria para darle movimiento a un fluido, ya sea hacia adentro o hacia afuera del sistema. Se pueden estable-

* Por conveniencia, el simbolo # representa a una libra de fuerza y lb a una libra de masa.

cer dos conceptos adicionales que son básicos en termodinámica, éstos son:

$$dU' = T\,dS - P\,dv \tag{2}$$

$$dq = TdS - dF \quad \text{(para un proceso irreversible tal como flujo de fluido)} \tag{3}$$

donde S = entropía
F = pérdidas irreversibles de energía llamadas fricción.

Sustituyendo 2 y 3 en 1, se obtiene la siguiente ecuación diferencial

$$v\,dP + \frac{du^2}{2g_c} + \frac{g}{g_c}\,dZ + dF = -dW \tag{4}$$

la que puede integrarse para dar

$$-W = \int_1^2 v\,dP + \frac{u_2{}^2 - u_1{}^2}{2g_c} + (Z_2 - Z_1)\frac{g}{g_c} + F \tag{5}$$

La Ec. 5 es la expresión básica para obtener el trabajo necesario para mover una masa unitaria de fluido entre dos puntos. Si el volumen específico v es constante, como se supone para fluidos incompresibles (líquidos), $\int_1^2 v\,dP$ se transforma a $v(P_2 - P_1)$.

El dimensionado de las tuberías en una planta de proceso depende de la longitud de la tubería y de la caída de presión deseable de acuerdo con el objetivo que se tenga. En estos cálculos conviene considerar por separado las secciones de tuberías que hay antes y después de las bombas y compresores (tuberías de succión y de descarga). En estas condiciones no se considera el trabajo en las secciones así consideradas, ya que el dispositivo que suministra trabajo al sistema no queda dentro de los límites del balance de energía. La ecuación para el cálculo de la caída de presión queda de la siguiente forma:

$$-\int_1^2 v\,dP = \frac{u_2{}^2 - u_1{}^2}{2g_c} + (Z_2 - Z_1)\frac{g}{g_c} + F \tag{6}$$

Los términos de velocidad (energía cinética) tienen valores muy próximos entre sí, por lo que se puede despreciar la cantidad $(u_2{}^2 - u_1{}^2)/2g_c$. Para muchos lugares, la aceleración debida a la gravedad es aproximadamente igual a g_c (32.17) de tal manera que el término g/g_c es casi igual a la unidad. Por lo tanto, si se considera flujo incompresible o de un volumen específico promedio, la Ec. 6 se transforma a:

$$v(P_1 - P_2) = Z_2 - Z_1 + F \tag{7}$$

donde $v(P_1 - P_2)$ es el cambio de "carga" en pies-lb fuerza/lb masa o pies-#/lb entre los puntos "1" y "2"

$Z_2 - Z_1$ es la diferencia de niveles entre los puntos "1" y "2".

Sus unidades son también pies-#/lb, ya que g/g_c es un término adimensional numéricamente igual a la unidad. Al término $Z_2 - Z_1$ algunas veces se le llama presión estática.

F = Pérdidas de carga en pies-#/lb debidas a la fricción.

En esta parte podrá parecerle al lector que se ha puesto mucho esfuerzo en los antecedentes, a fin de obtener una ecuación tan simple para calcular la caída de presión en la tubería de un proceso. Sin embargo, esto se justifica si con ello se evita la confusión que a veces resulta con el empleo del término "carga". Se ha demostrado que la Ec. 7 se obtuvo a partir de un balance de energía, basado en que fluye una masa unitaria (una libra) de fluido, y que los términos que aparecen al final de la ecuación tienen las unidades de pies-lb de fuerza por lb de masa (pies-#/lb), y no simplemente pies como algunas veces erróneamente se supone. El conocimiento de este hecho evita confusiones, especialmente si van a hacerse conversiones a otro sistema de unidades.

La parte principal en el cálculo de la caída de presión es la estimación de las pérdidas debidas a la fricción F. Los estudios experimentales del arrastre ejercido en las paredes de un conducto por el que fluye un fluido, han determinado la ecuación de "Fanning":

$$F = \frac{fLu^2}{2\,g_c D} \tag{8}$$

donde F = pérdidas de fricción en pies-#/lb

f = constante de proporcionalidad llamado coeficiente de fricción.

L = longitud del conducto circular, en pies

g_c = 32.17 pies-lb/(#)(seg)^2

D = Diámetro interior del tubo en pies

Mediante el análisis dimensional se demuestra que el factor de fricción f está relacionado con el número de Reynolds $Du\rho/\mu$, y de un factor adimensional llamado rugosidad relativa, ε, el cual toma en cuenta las irregularidades de la superficie. Moody[16] determinó experimentalmente estas relaciones y presentó gráficamente los resultados de su trabajo en las Figs. 18-23 y 18-24. De estas gráficas se puede estimar el factor de fricción f para cualquier diámetro de tubo. Sin embargo, es de notarse que los datos se refieren a tubo de superficie limpia, ya que no es posible presentar en una forma lógica los efectos de los diferentes tipos de sarro que se desarrollan

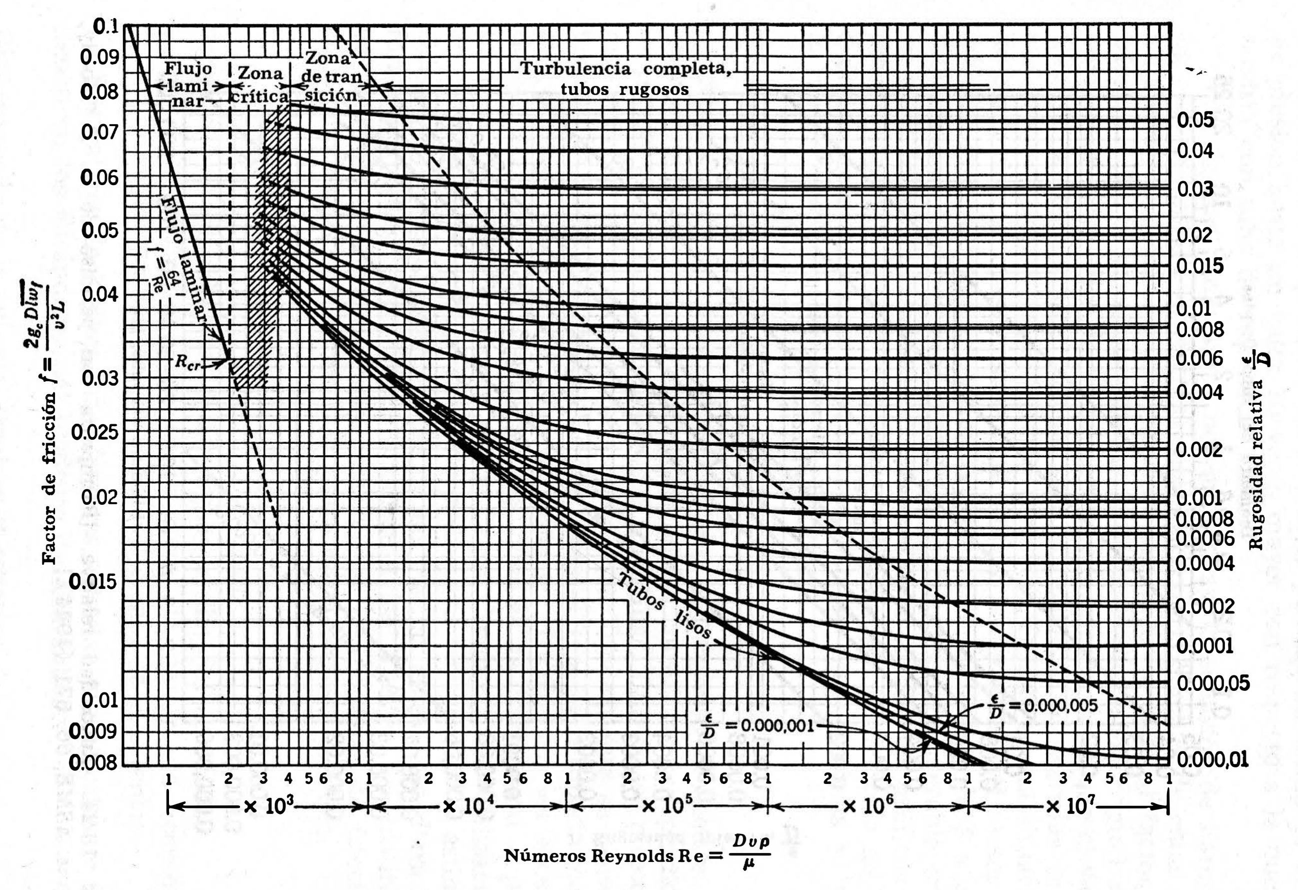


FIG. 18-23. Gráfica de Moody para factores de fricción. [Reimpresa con permiso de L. F. Moody, Trans. ASME, 66, 671 (1944).]

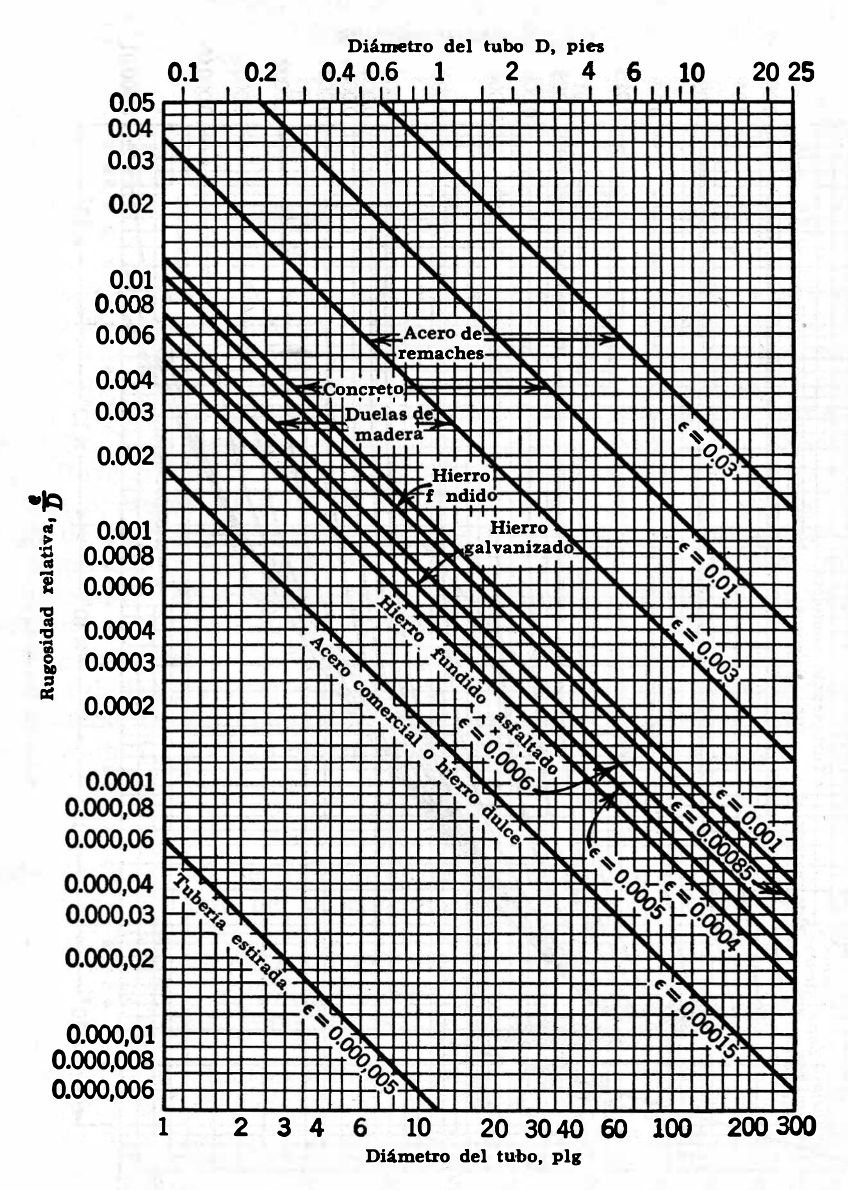


FIG. 18-24. Rugosidad relativa. [Reimpresa con permiso de L. F. Moody, *Trans. ASME,* 66, 671 (1944).]

en las tuberías de proceso. Estos efectos pueden aumentar la caída de presión hasta un valor 10 veces mayor con respecto a la que se tendría con tubo de superficie limpia.

Por algunas razones que no son lógicas, la ecuación de Fanning ha sido presentada en formas muy diferentes. Muchas de estas variaciones son debidas a la definición que se le ha dado al factor de fricción f. En algunos trabajos se ha definido de un valor igual a la cuarta parte del valor de f aquí presentado. Desde luego que el valor final de las pérdidas de fricción será el mismo si se usan las ecuaciones con los factores de fricción correctos. Debido a esta situación de confusión, lo más sensato será utilizar las gráficas del factor de fricción que indiquen la definición del valor particular de f a que está trazado, pues de otra manera se tendrá un considerable error en los cálculos (cuatro veces mayor). Debido a que las gráficas de Moody han sido seleccionadas como estándar por el Instituto de Hidráulica, resultará buena práctica el uso de estas gráficas y, por lo tanto, también la ecuación de Fanning.

Pérdidas en los accesorios

Aplicando la Ec. 8 se pueden calcular las pérdidas de fricción en tramos rectos de tubo. También se deben considerar las pérdidas en las diferentes flexiones, accesorios y válvulas. Uno de los métodos más sencillos para estimar las pérdidas por fricción que se presentan en una tubería, es sumándole a la longitud real de la tubería recta, otra longitud equivalente a las pérdidas por fricción en los accesorios y válvulas. Estas longitudes equivalentes se determinan a partir de la Fig. 18-25 publicada por la Crane Company.[8] La utilización de estas gráficas resulta muy adecuada para los cálculos y estimaciones que se tienen que efectuar en las plantas de proceso. Para información más exacta deberá acudirse a las Normas del Instituto de Hidráulica.[23] Resulta lógico pensar que las pérdidas de fricción en los accesorios consumen una parte de la energía cinética.

$$F = K \frac{u_1^2}{2g_c}$$

donde u_1 = velocidad del fluido aguas arriba del accesorio.
K = constante empírica determinada para cada accesorio en particular, llamado coeficiente de resistencia.

Los valores de K para las diferentes válvulas y accesorios se obtienen en los Estándares del Instituto de Hidráulica.

Dimensionado de la tubería, técnicas y criterios

El método de dimensionar las tuberías de un proceso es una técnica familiar a los ingenieros. Se supone el diámetro del tubo y se

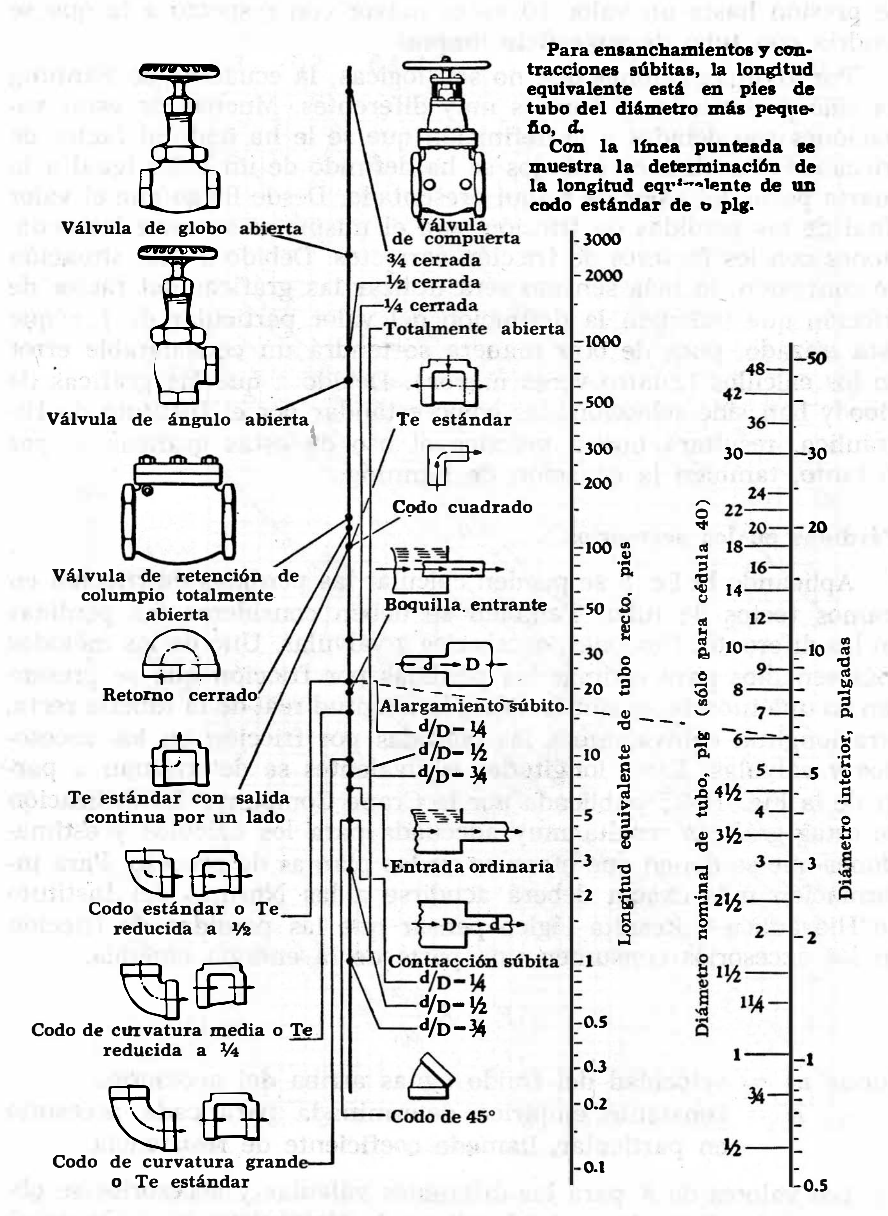


FIG. 18-25. Resistencia de válvulas y accesorios. (Cortesía de Crane Company.)

calcula la caída de presión; si ésta es satisfactoria, entonces el diámetro supuesto del tubo es adecuado.

El problema, entonces, consiste en decidir qué caída de presión es satisfactoria. Si se usa una gran caída de presión, los costos de bombeo pueden ser excesivos. Si se usa una caída de presión baja, los costos de tubos, válvulas y accesorios son elevados. Esto sugiere un balance económico entre los costos del material y el costo del bombeo. Teniendo los costos unitarios de estos dos conceptos, resultará fácil desarrollar una ecuación general del costo total; esta ecuación debe resolverse para su valor mínimo después de diferenciarla e igualarla a cero. Se pueden construir gráficas para determinar el tamaño de tubo que resulte más "económico". Se han presentado muchas de estas gráficas, pero tales aproximaciones que simplifican los cálculos pueden resultar inadecuadas para algunos problemas muy complicados. Por lo tanto, resulta inútil la generalización al tamaño más económico de tubo en aquellas situaciones únicas en las que no hay problemas de bombeo, y no se conocen exactamente los costos de la energía eléctrica.

Muchas compañías dedicadas al diseño de tuberías han preparado estándares que especifican caídas de presión admisibles, o velocidades razonables que se usan como guías para calcular el diámetro del tubo. Algunas de estas normas típicas son:

	Velocidad razonable (Tube Turns Co.)	Caída de presión admisible debida a la fricción
En la descarga de la bomba	$d/2 + 4$ pies/seg	2 lb/plg²/100 pies
En la succión de la bomba	un tercio del anterior	0.5 pies-#/lb por 100 pies,
Vapor o vapor de agua	*d en 1 000 pies/min	0.5% de la presión en la tubería por 100 pies.
Flujo de líquidos por gravedad		0.2 pies-#/lb por 100 pies
Tuberías para agua	5-7 pies/seg	

* Diámetro interior del tubo en pulgadas.

Estas y algunas otras reglas empíricas similares han probado, durante muchos años, ser de mucha utilidad a los ingenieros. Sin embargo, a menudo se les ha dado carácter de leyes naturales y esto ha causado más daño que beneficio. Ninguno de los dos métodos, el de velocidad razonable y el de caída de presión admisible, dará el tamaño exacto del tubo que sea más económico para todos los casos. El método de velocidad no considera los cambios en la densidad del fluido, y el de caída admisible de presión no reconoce que la caída de presión más económica debe ser mayor para tubos pequeños que para tubos grandes. Ninguno de los dos métodos toma en cuenta las variaciones del material ni los costos de la energía eléctrica. A pesar de todas estas objeciones, resulta válido el dimensionado de las tuberías para la mayoría de los casos. Aunque en muchos casos puede argüirse que los diseños resultan muy sobrados, es de comprenderse que después de mucho tiempo de usar las normas,

TABLA 18-7. PRECIOS DE TUBOS Y ACCESORIOS*

Precio base: Acero al Carbono ASTM 106 Grado A o igual a $0.105 por libra.
Pesos base: (Basado en tubo de acero al carbono).

	Peso lb/pie		
Tamaño, Plg	Cédula 10	Peso estándar	Extra fuerte
2	2.64	3.65	5.02
3	4.33	7.57	10.25
4	5.61	10.79	14.99
6	9.29	18.97	28.55
8	13.40	28.55	43.40
10	18.70	40.48	54.70
12	24.20	53.60	65.40
14	36.70	55.00	72.10
16	42.10	63.00	82.80
18	47.40	71.00	93.50
20	52.70	78.60	104.10
24	63.40	94.60	125.50

Accesorios	L_c/D equivalente Relación longitud a diámetro	
Codo de 90°, radio corto y largo	1.3	
Tes sin reducción en la salida	2.1	
Tes de salida reducida	2.6	(12" y menores)
	2.1	(14" y mayores)
Flexiones de 180°, radio grande	3.0	
Reductores concéntricos	0.50	
Reductores excéntricos	0.60	
Casquillos en uniones solapadas	0.80	

Factores del material para tubos y accesorios	Multiplicar por
Acero al carbono	1
4-6% de cromo, ½% molibdeno	3.25
Inoxidable tipo 304	10.2
Inoxidable tipo 316	16.07

* Reimpreso con permiso de Rase, H. F., *Petroleum Refiner*, 32, No. 8, 141-144 (1953).

éstas forman parte de la organización y en forma inconsciente se producen diseños sobrados.

No es posible ni justificado el hacer un estudio económico y detallado de cada tubería de una planta de proceso, a fin de seleccionar el tamaño de tubo más apropiado. Sin embargo, hay ciertos casos, particularmente en el dimensionado de tuberías de aleaciones muy caras o de tuberías de acero al carbono de gran longitud, en los que sí se justifica un estudio más detallado a fin de decidir entre dos posibles tamaños de tubos.

Se conoce un método rápido[21] para estimar los costos de las tuberías de una planta de proceso, por el que en forma muy rápida

TABLA 18-8. PRECIOS DE BRIDAS*

Precios base

(Base: 150 lb ASA RF, garganta soldada, ASTM A-181 (Aprox. 40 ¢/lb)

Tamaño	Costo, $
2	3.5
3	5
4	6.5
6	9
8	14
10	20
12	35

Clasificación libras	Multiplicar por: Cara resaltada	Multiplicar por: Unión tipo anillo
150	1.0	1.5
300	1.22	3.5
600	4.3†	5.0‡
900	5.5†	6.5‡
1500	9.0†	9.5‡

Factores según tipo de brida	Multiplicar por
garganta soldada	1.0
corrediza	0.65

Factores del material	Multiplicar por
Acero al carbono ASTM A-181	1.0
4-6% cromo, ½% de molibdeno (ASTM 182 F5)	3.50§
Tipo inoxidable 316	5.0 §

* Reimpreso con permiso de Rase H. F., *Petroleum Refiner*, 32, No. 8, 141-144 (1953).
† Usese 4.0 sólo para tamaños 2, 3 y 4 plg.
‡ Usese 4.5 para tamaños 2 y 3 plg y 5 para 4 plg.
§ Sólo para bridas de garganta soldada de 150 a 300 lb.

podrán hacerse comparaciones de costo entre dos posibles tamaños de tubo. Se justificará un estudio más detallado al encontrarse una gran diferencia de costos entre dos posibles soluciones. En las Tablas 18-7, 18-8, 18-9, y 18-10 se proporcionan datos y, además, se tiene una ilustración de su uso.

Caídas de presión en tuberías de gas y vapor

Muchas tuberías de procesos que conducen gases y vapores, son de longitud corta y sus extremos no varían mucho en elevación como para justificar cambios de la presión estática o de su densidad. En estos casos, para efecto del cálculo, se considera una presión prome-

TABLA 18-9. COSTOS DE FABRICACION Y ERECCION*

Costos de fabricación	Multiplicar los costos de tubo, brida y accesorios de acero al carbono por
Material	
Acero al carbono	1.0
Níquel y aleaciones de acero al níquel (18-8 Monel)	2.0
5% de cromo (no níquel) y aceros altos	2.5

Costo de erección

Se considera que es aproximadamente igual al valor del costo de fabricación de la tubería de acero al carbono, o sea al costo del material del tubo de acero al carbono, accesorios y bridas más el costo originado por la fabricación de las partes. Esto también es aplicable a instalaciones de tubo de aleación que no requieren soldadura en la obra. Si es necesario soldar en la obra, se sugiere multiplicar por los siguientes factores aplicables al costo de un sistema equivalente de acero al carbono tomando en cuenta ajustes especiales y relevación de esfuerzos.

Aceros inoxidables	1.5
4-6% de cromo	1.2

* Reimpresa con permiso de Rase, H. F., *Petroleum Refiner,* 32, No. 8, 141-144 (1953).

TABLA 18-10. PRECIOS DE VALVULAS*

Tamaño	Precio base (ajustable) costo acero 150 lb O.S. y Y, válvula de compuerta
2	70
3	85
4	120
6	205
8	290
10	400
12	530

Clasificación libras	Multiplicar por: Cara resaltada	Multiplicar por: Unión tipo anillo
(125)	(Véase hierro fundido más adelante)	
150	1.0	—
300	1.6	1.7
400	2.4	2.5
600	3.4	3.6
900	4.3	4.6
1500	6.7	7.1

* Reimpresa con permiso de Rase, H. F., *Petroleum Refiner,* 32, No. 8, 141-144 (1953).

TABLA 18-10. (*Continuación*)

Factores del material	Multiplicar por
Materiales	
5% de cromo	
½% de molibdeno	1.25
Monel	2.1
Acero inoxidable, tipo 316	1.7 (sólo 150 lb)
Hierro fundido (125 lb)	0.45

Factor según tipo de válvula	Multiplicar por
Tipo de válvula	
Compuerta	1.0
Globo	1.2
Retención	1.0 para clase 150 0.7 para otras clases

Ilustración—estimación de los costos de una instalación.* Determinar los costos de materiales y erección de tubería de acero al carbono de 6 plg, cédula 40, que se presentan en la descarga de una bomba, clasificación (RF) ASA 150 lb; la longitud de tubería recta es de 325 pies y está compuesta de 12 bridas, 16 codos soldados, 1 te, 1 válvula de retención y 2 válvulas de compuerta.

a. Tubo y accesorios (véase Tabla 18-7).

$\frac{L_e}{D}$, Longitud equivalente, pies

325 pies de tubo		325
16 codos	(16)(1.3)(6) =	125
	(1)(2.1)(6) =	13
	Total:	463 pies

$$\text{Peso total: } (463)\left(\frac{\text{lb}}{\text{pie}}\right) = (463)(18.97) = 8780$$

Costo: (8780)(0.105) = \$922

b. Bridas (véase Tabla 18-8)
(12)(9) = \$108

c. Fabricación (véase Tabla 18-9)
Costo total bridas y tubos = 922 + 108 = \$1030
Costo de fabricación = (1.0)(1030) = \$1030

d. Costos de erección (véase Tabla 18-9)
Costo = 1030 + 1030 = \$2060

e. Costo de válvulas (véase Tabla 18-10)

2 Válv. Comp.	(2)(205) =	\$410
1 Válv. Retención	(1)(205)(1.0) =	205
		\$615

* Reimpresa con permiso de Rase, H. F., *Petroleum Refiner*, 32, No. 8, 141-144 (1953).

Costo total del sistema ya instalado

$$(a) + (b) + (c) + (d) + (e) = \$4735$$

Si esta tubería fuera construida de cédula 40, de aleación 4-6% de cromo molibdeno, con bridas de cromo molibdeno 300 #RTJ, el costo se estimaría usando los factores adecuados.

a.	(922)(3.25)	=	$ 3 000
b.	(108)(3.5)(3.5)	=	1 322
c.	(1030)(2.5)	=	2 580
d.	1030 + 1030	=	2 060
e.	Compuertas: (2)(205)(1.7)(1.25)	=	872
	Retención: (1)(205)(1.7)(1.25)	=	436
		Total	$10 270

dio y la caída de presión por fricción se calcula como si fuera un fluido incompresible.

La suposición de densidad promedio no es válida cuando la caída de presión es grande y la tubería es de gran longitud. Despreciando la carga estática se puede escribir para la caída de presión

$$v\,dP = \frac{fu^2\,dL}{2g_c\,D} \tag{9}$$

el volumen específico puede expresarse como PM/zRT, suponiendo una temperatura promedio T y un factor de compresibilidad promedio z (P es la presión absoluta, M el peso molecular del gas y R la constante del gas). La velocidad u puede escribirse como $zRTW4/PM\pi D^2$ donde W es el gasto en masa por unidad de tiempo. Sustituyendo estos valores en la Ec. 9 se obtiene la ecuación de Weymouth, la que toma en consideración el cambio de densidad debido a la presión.

$$P_1{}^2 - P_2{}^2 = \frac{16\,fLW^2zRT}{g_cM\pi^2D^5} \tag{10}$$

donde P = lb/pie²
L = pies de tubo
W = lb/seg
D = diámetro interior en pies
R = 1544
T = °R

Resultan ecuaciones muy complicadas cuando no se desprecia el cambio de presión causado por la diferencia de elevaciones como las que se encuentran en un pozo profundo de gas. Se han presentado algunas soluciones,[6,12,19] mas estos problemas se presentan raras veces en una planta de proceso.

ESPECIFICACIONES DE TUBERIA

Se han preparado con mucho cuidado las especificaciones de tuberías para obtener los diseños más económicos. Las especificaciones describen tubos, válvulas, accesorios y demás elementos según sea el tipo de servicio a prestar; esto junto con los dibujos de la tuberías constituyen una descripción completa de todo el sistema de tuberías.

El primer paso para formular las especificaciones de la tubería, es el de la preparación de una lista de todos los procesos y fluidos utilizados en la planta. La lista incluye la descripción de cada fluido, su presión, temperatura y cualquier otra particularidad del servicio. Un estudio detenido de esta lista basado en el conocimiento de las propiedades de los materiales de las tuberías, así como también de las condiciones de operación, revelará ciertas categorías o clasificaciones de los servicios sobre los que se basarán las especificaciones.

En la elaboración de las especificaciones debe evitarse ir a los extremos. Se pueden tener especificaciones por separado para cada fluido y también para ciertas clases de operaciones pequeñas. Sin embargo, siempre debe buscarse tener ahorro en el precio de lo que se compra, lo que se consigue con la ayuda del personal de compra y de ingeniería con respecto de los costos de construcción indicados en las diferentes especificaciones. El otro extremo es preparar solamente una o dos especificaciones con la lista de los materiales que puedan resistir las condiciones de operación más severas, con lo que no se proporcionan los materiales más adecuados para la tubería, teniéndose además un costo de operación elevado.

Se debe encontrar un número óptimo de categorías entre estos dos extremos. Para cada proyecto debe hacerse un estudio cuidadoso a fin de determinar los elementos más adecuados. Unas pocas semanas extras de trabajo dedicadas a la preparación de las especificaciones de la tubería, producirán después un gran ahorro en tiempo y en el costo del equipo.

Nomenclatura

Como se explicó en el Cap. 5, es conveniente designarle a cada fluido un símbolo o letra, y un símbolo conveniente a cada categoría o especificación. Estos símbolos, con el número de la tubería, incluyen la descripción completa de cada sección de la tubería y se utilizan con los diagramas mecánicos o de flujo, con los dibujos de las tuberías, o con las listas de los materiales para su almacenaje durante la construcción.

A las válvulas también se les describe por un sistema de numeración. Es común incluir en las especificaciones de la tubería el número del catálogo correspondiente a la válvula a usar, agregándole inmediatamente las palabras "o equivalente" después del número de la

válvula. El indicar el número de la válvula en los dibujos de la tubería reduce el tamaño y la complejidad de las notas sobre el dibujo. Además se usa el mismo número en la lista de los materiales y en las órdenes de compra. El fabricante de válvulas entrega éstas con una tarjeta donde se indica el número asignado, facilitando de esta manera la identificación durante el almacenaje de las mismas.

Se prepara una lista, puesta en orden numérico, de las válvulas que van a usarse; esto se hace al tiempo o después de haber hecho las especificaciones de la tubería. Es común indicar en la lista de las válvulas los datos referentes a las dimensiones que hay entre los extremos de la válvula, así como también otros datos pertinentes tales como la clasificación de la ASA para la brida. La lista ayuda a la elaboración de los dibujos, ya que se trata de una recopilación de todos los datos a usar en los dibujos de la tubería.

Preparación de las especificaciones

A fin de facilitar las explicaciones de la técnica que se emplea en la preparación de las especificaciones, se muestra más adelante un ejemplo típico. Esto es precedido por la selección de materiales y por las categorías de la especificación.

En la Tabla 18-11 se presenta un resumen de los fluidos a considerar junto con las condiciones de servicio, y se indican letras para las designaciones.

Se restringió a las 5 letras M, N, P, Q y Z para la especificación de las categorías. Esto hizo posible especificar ciertas partes, tales

TABLA 18-11. RESUMEN DE FLUIDOS PARA EJEMPLO DE ESPECIFICACION DE TUBERIA

Designación del fluido	Servicio y fluido	Operación Pres. Man. lb/plg²	Operación Temperatura °F
HC	Hidrocarburo	250	800 Máxima
HB	Hidrocarburo	250	800
HA	Hidrocarburo	250	750 Máxima
H	Hidrocarburo	100	600
S	Vapor de agua	275	410
SE	Vapor, escape	40	290
SC	Vapor, condensado	15	240
A	Aire, de uso	100	Ambiente
AC	Aire, seco para instrumentos	50	Ambiente
F	Combustible, gas natural, seco	50	Ambiente
C	Cáustica	50	Ambiente
IN	Tubería para instrumentos	Mismo, servicio de tuberías	
WF	Agua, contra incendio	100	Ambiente
WC	Agua, para procesos enfriamiento	75	85
W	Agua, uso común	75	Ambiente
WS	Agua, servicios sanitarios	40	Ambiente

como tornillos, de acuerdo a la clase de fluido. Además se tuvo mucha simplificación por el cuidado de la planeación, de tal modo que las especificaciones fueron limitadas a cuatro tipos de bridas, dos tipos de tornillos y cinco tipos de tubo.

En este punto, es de mucha utilidad en una organización que el ingeniero de proyecto esté enterado de la eficiencia en cuanto al aprovechamiento de los materiales. Antes de completar las especificaciones, el ingeniero deberá determinar si los materiales especificados son eficaces, de otra manera habrá que hacer sustituciones para evitar mal uso de ellos. En algunos casos es deseable tener listas dobles para el caso de materiales de suministro incierto.

El ejemplo de especificaciones no necesariamente debe interpretarse como una recomendación para cierto tipo de válvulas, accesorios o materiales de tuberías. Este ejemplo se hizo solamente como una ilustración de las especificaciones de una tubería y como una guía para verificación de especificaciones, y como una recomendación de elementos específicos. La peor práctica que pueda seguirse en un diseño de ingeniería es copiar las especificaciones usadas en algún proyecto anterior. Tanto los materiales como el equipo, deben ser evaluados para cada trabajo, y las dimensiones producidas deben analizarse cuidadosamente tomando como base las condiciones que prevalezcan para cada uno de los diseños.

Selección de bridas y tornillos y empaques

De acuerdo a la ASA B16-5 del código, las bridas ASA 150 lb son adecuadas para todos los servicios indicados en la Tabla 18-11, excepto para los S, HA, HB y HC para los que se necesitan bridas ASA 300 lb. El caso F también puede quedar dentro de los límites de la ASA 300 lb lo que permite presiones de 340 y 300 lb/plg² para temperaturas de 750 y 800°F respectivamente. Para todos estos servicios se pueden utilizar bridas de cara saliente. Sin embargo, para el servicio HC aunque opera a temperatura y presión menores que para el caso HB (300 lb/plg² manométricas y 800°F máximo) se especifican bridas de unión tipo anillo (RTJ), ya que este servicio es para calentamiento cruzado para el que el tiempo de operación puede ser más rígido. La brida refrentada RTJ (Tabla 16 del código) permite operar a temperatura de 850°F y presión manométrica de 300 lb/plg². Utilizándola se tiene un margen de seguridad de 50 lb/plg² y 50°F.

Para los servicios A, AC, F y C se especifican bridas ASA 150 lb, ya que ésta es la clasificación nominal menor que se tiene para bridas de acero. Para el servicio AC, que es para aire seco a usarse en instrumentos, se usan con frecuencia tuberías galvanizadas, utilizando con estas bridas accesorios de hierro maleable, los que van atornillados. Sin embargo, para este servicio con tubería galvanizada, todos los accesorios serán de acero forjado y las bridas de acero fundido,

debido a la posibilidad de incendio. Por las mismas razones se usan accesorios y bridas de acero para los servicios A, F y C, en los que las tuberías no son galvanizadas.

Para los instrumentos para el servicio IN deben tener las mismas especificaciones que para la tubería del proceso cuando se tiene contacto con el fluido del proceso.

Selección de empaques

Para todos los servicios se especifican empaques de asbesto comprimido tipo anillo, excepto para los S, HA, HB y C. Para estos servicios que son severos, se usa empaque de hierro acanalado o de enchaquetado doble o de relleno de asbesto. Para el HC se necesita brida de cara saliente con unión tipo anillo, necesitándose también empaques tipo anular.

Selección del tubo

El espesor del tubo necesario para cada servicio, puede determinarse a partir de la ecuación presentada previamente y recomendada por el código [$t = (PD/2S) + C$]. Por la referencia de la Tabla 21 del código, se indica que puede usarse material ASTM A 106 para servicios en los que se tengan temperaturas mayores a 800°F. El esfuerzo admisible para grado A, a 800°F y cédula 80 es de 9 300 lb/plg^2. El tubo de cédula 40 ASTM A 106 es el adecuado para los servicios HB y HA. Para todos los demás servicios, excepto para el WS (y para los servicios W en que se especifique tubo de hierro fundido) deberá especificarse el tubo sin costura más barato ASTM A-53 grado A. Debe especificarse tubo ASTM A-120, que es tubo galvanizado, para el servicio WS para aguas sanitarias.

Debe usarse tubo de 2 plg, o menor, para todos los servicios, excepto para el *WS* que utiliza tubos sin costura, cédula 80, ASTM A-83. Se usa cédula 80 para los tubos más pequeños a fin de tener rigidez estructural. En el tiempo en que se escribió este libro, resultaba más fácil conseguir el tubo ASTM A-83 aun cuando era más caro (éste se construye conforme a las especificaciones más exactas de tubo) que el ASTM A-106 o el A-53.

Para las tuberías pequeñas que se usan para proporcionar aire a instrumentos, debe especificarse tubo de ⅜ plg de diámetro exterior de material cobre, con recocido suave y accesorios de materiales no ferrosos.

Especificaciones para el diseño de tuberías típicas

1.000. *General*

1.100. *Bases del diseño.*

El diseño, fabricación y erección de todas las tuberías y accesorios deberá hacerse conforme a las prácticas especificadas en el Code for Pressure Piping

ASA B31.1-1951 o de la última publicación, lo mismo para los dibujos que para las especificaciones siguientes. Todas las referencias que aquí se indican se sobreentiende que se refieren al código anterior ASA.

1.200. *Definiciones.*

En general, toda la terminología usada en las especificaciones y en los dibujos se refiere a términos comercialmente usados.

Anclas. Al punto donde se fija la tubería se le llama punto de anclaje. Se le llama ancla al dispositivo utilizado para sujetar el tubo, o a la estructura completa si ésta sirve para fijar el tubo.

Purgador. Es una válvula pequeña que sirve para purgar líquidos.

Cortador de flujo. Es una placa que se inserta en la brida para aislar una parte del sistema.

Válvula de bloque. Es una válvula acondicionada para cerrar un sistema. El término es mal empleado y puede entenderse que es una válvula cualquiera usada para cerrar un servicio, en vez de estrangularlo.

B.O.P. (Bottom of outside of pipe). Lecho exterior de un tubo usado para utilizar el soporte del tubo.

Válvula de control. Cualquiera de los diferentes tipos de válvulas operadas a distancia por algún tipo de instrumento.

Orientación. La dirección al norte indicada en los planos y en algunos otros dibujos servirá para conocer la orientación del equipo.

Tubo vertical de desagüe. Es un tubo vertical que descarga en otro horizontal cuyo objetivo es extraer el condensado.

F.W. (Field Weld).* Soldadura en la obra.

Gradiente. La caída sucesiva en la elevación de la tubería a fin de asegurar que el flujo drene y caiga por gravedad.

Guía. Aditamento para controlar la dirección del movimiento de la tubería.

Soporte colgante. Se le llama soporte colgante a un dispositivo que puede ser una varilla y abrazadera, una cadena o un dispositivo con resorte que se utiliza para soportar el tubo.

Línea. Es un tubo que va de un punto a otro. La designación del Número de Línea es un número y un símbolo que aparece en los dibujos de la tubería, con el que se identifica a la tubería de acuerdo a su tamaño, fluido del proceso, localización general y especificaciones.

P.E. (Plain End).* Indica tubo con extremos planos. Se le usa para diferenciarlo del tubo con extremos roscados.

P.S. (Pipe Support).* La designación P.S. se utiliza para indicar soporte del tubo; este soporte puede ser una ancla guía o zapata o una combinación de varias de ellas para formar el soporte.

Tubo de longitud no definida. Es el tubo que no se fabrica a una longitud determinada.**

Zapata. Dispositivo soldado o grapado al tubo, el cual le proporciona soporte.

S.P. (Sample point).* Punto de muestra. Es una válvula pequeña con la tubería necesaria a fin de obtener muestras del interior de la tubería.

Espec. Se refiere a las especificaciones de una tubería.

Carrete. Es un tubo corto con bridas en sus extremos. (Este término también se usa para indicar que se trata de una pieza de tubo fabricado,

---

* Se han incluido entre paréntesis los significados en inglés de las definiciones indicadas con iniciales, por creerse que esto ayuda a comprender mejor el concepto. (N. del T.)

** Los tubos de acero al carbono nunca se adquieren a una longitud *exacta*. El vendedor proporciona los tubos y fija el precio por cada 100 pies de longitud del tubo. El tubo se mide al embarcarse y al recibirse. El vendedor factura de acuerdo a la longitud de embarque.

Por lo general, los tubos tienen de 18 a 20 pies de longitud. También hay tubos del doble de longitud para ciertos diámetros y se ordenan cuando se requieren secciones de 40 pies de largo, los que se utilizan con mucha ventaja en ciertas instalaciones.

pero una pieza de tubo fabricado no tiene necesariamente bridas en los extremos. Un objeto de mayor tamaño, como por ejemplo un recipiente, puede estar fabricado con placas de lámina a las que se les asigna un número para su identificación.)

Número de carrete. Es el número usado para identificar a una de las piezas fabricadas con tubo.

S.T. (Steam Trap).* Trampa de vapor. Por lo general, se indica en forma esquemática a la trampa, válvulas y tuberías necesarias para hacer derivaciones en caso de emergencia.

Cedazo. Es una placa metálica perforada que se coloca temporalmente en la unión bridada, para proteger al equipo contra materia extraña durante el periodo inicial de trabajo. Hay, además, cedazos permanentes en los lugares necesarios.

1.300. *Sistema para numeración de las tuberías.*

Se utiliza un sistema de numeración, el cual se indica en los dibujos de tuberías para la identificación de todos los elementos. La numeración completa consiste de los siguientes términos: 4-HA-101-M. El primer número indica el tamaño nominal del tubo. El término H.A. designa el tipo de servicio, el número 100 indica el número del área y por M se designa la especificación que se aplica al tubo.

Los números podrán cambiar: (1) Cuando cambia el tamaño del tubo; (2) cuando cambia la especificación; (3) cuando existen ramales que salen de la línea original; (4) al contarse una línea adicional el número puede simplificar el dibujo de la tubería.

1.400. *Tamaños de tubos.* El diámetro de los tubos se obtiene de acuerdo a la caída de presión estipulada y con la operación adecuada del equipo. En general se aplican las siguientes limitaciones:

1.401. No se usan tubos de tamaño 3/8 plg, 1¼, plg 2½ plg, 3½ plg, 4½ plg, 5 plg y 7 plg.

1.402 Los tubos para toma de muestra y para ventilación son de un diámetro mínimo de ¾ plg, a menos que se indique otra cosa. Los drenes para tuberías que conducen fluido caliente no deben ser menores de 1½ plg tamaño nominal.

1.403. Con excepción de las tuberías empleadas para instrumentos, las que van soportadas no deberán ser menores de 2 plg. Podrán emplearse tubos de mayor diámetro en tramos cortos de tubería, y en algunos casos especiales de acuerdo al espacio que haya entre los soportes.

1.404. Las tuberías subterráneas que traspasan el área donde se tiene el proceso, deberán ser de 3 plg o mayores. Las tuberías para sanitarios (WS.) deben ser de 2 plg como mínimo. Algunas otras tuberías de servicio pueden ser de tamaño menor, pero deben considerarse como casos especiales y quedan dentro de los límites de la seguridad.

1.500. *Notas generales referentes al diseño de tuberías.*

1.501. *Tuberías instaladas sobre la superficie del piso.*

Todas las tuberías que estén dentro del área del proceso y todas las que se encuentren en los patios adyacentes a dicha área, exceptuándose las tuberías de agua de uso, de aguas negras y de ciertas tuberías para bombas y compresores, deberán instalarse por sobre la superficie del piso, arriba de durmientes de concreto o en soportes estructurales de acero.

1.502. *Disposición de las tuberías que van sobre la superficie del piso.*

Las líneas o tuberías sobre la superficie del piso instaladas en el mismo plano, deberán colocarse de tal modo que el lecho inferior de los tubos, sin

tomar en cuenta el aislamiento, esté a la misma elevación. Debe proveerse suficiente claro para colocar a los tubos el aislamiento, su altura regulará la elevación de las tuberías no aisladas.

1.503. *Elevación de las tuberías que van sobre la superficie del piso.*

Cuando las tuberías se instalan en grupos paralelos, deberá seleccionarse una determinada elevación para las tuberías que corran de norte a sur, y otra distinta para las que corran de este a oeste. Cuando se instalan por una orilla varias capas paralelas de tubos, el espacio que debe haber entre el lecho inferior de los tubos de una de las capas y el tope del tubo de la capa adyacente, deberá ser tres veces el tamaño nominal del tubo más grande de cualquiera de los dos grupos, más dos veces la dimensión radial que se tiene entre la parte exterior de la brida y la parte exterior del tubo; esto para el tubo más grande. Ordinariamente las tuberías cambian de elevación cuando cambian de dirección, excepto en casos especiales a discreción del diseñador, y para tuberías que no estén instaladas por las orillas. La separación entre tubos será la indicada anteriormente. El tamaño del tubo mayor regulará los espacios que deban existir entre dos diferentes capas de tubo (para fines de orientación en todos los dibujos se indica arbitrariamente la dirección hacia el norte).

1.504. *Elevación de las tuberías subterráneas.*

Todas las tuberías enterradas deberán tener un cambio en su elevación al ocurrir un cambio en la dirección de las mismas; se exceptúan los tubos de 24 plg o más, los tubos de drenaje y para alcantarillas. Debe evitarse, hasta donde sea posible, el que todas las tuberías enterradas drenen en un mismo punto común de bajo nivel. Deberá tenerse acceso a los puntos de drenado.

1.505. *Localización de válvulas; uso de operadores de cadena.*

Las válvulas utilizadas en la planta, las cuales pueden ser válvulas de control con diafragma, válvulas operadas con motor, válvulas especiales con control manual y válvulas macho lubricadas, deben instalarse de tal manera que resulte fácil el acceso a ellas, usando plataformas o escaleras cuando se encuentren a una determinada altura.

En general, se puede decir lo mismo para las válvulas de bloque, de retención, etc., a menos que no se requiera ajustar la válvula durante la operación del proceso, en cuyo caso se podrá utilizar una varilla de extensión o una cadena para abertura o cierre de la válvula. La distancia máxima que puede haber hasta el centro de la válvula sin que sea necesario usar varilla de extensión o cadena, es de siete pies y tres pulgadas (7′3″). Las cadenas podrán quedar a tres pies (3′) de la plataforma, desde donde se podrá operar la válvula.

Sin embargo, el uso de las cadenas debe reducirse al mínimo. En los dibujos debe indicarse cuáles son las válvulas que requieren de cadena para su operación. Se pueden adaptar en la obra varillas de extensión para operar válvulas de 1½ plg en lugar de usar ruedas y cadenas.

1.506. *Espacio libre para tránsito.*

Las tuberías elevadas provenientes de depósitos o de equipos elevados, colocadas en estructuras de acero o en durmientes de concreto, deberán instalarse dejando un espacio libre mínimo de 25′0″, con respecto al nivel de la calle que haya en la planta o con respecto a la vía del ferrocarril. Además, debe dejarse un espacio mínimo de 9′0″ con respecto al nivel de banquetas

y plataformas, o con respecto a la superficie del firme que se localice en el área del proceso.

1.507. *Doblado del tubo.*

Los tubos no deben flexionarse a un radio menor de cinco (5) veces el tamaño nominal del tubo. En caso de excepciones podrá solucionarse el problema usando accesorios de radio corto, los que van soldados al tubo. Estos accesorios especiales deben especificarse en los dibujos. De ser posible, debe dejarse un tramo recto, equivalente a dos o más diámetros del tubo, entre dos flexiones adyacentes. Los tubos de cuatro pulgadas o menores podrán doblarse en frío o en máquinas dobladoras. A los tubos de aleación, o a algún otro tubo sujeto a esfuerzos altos por flexionado en frío, deberá dárseles tratamiento especial de acuerdo a procedimientos especificados.

1.508. *Válvulas de ángulo.*
Debe evitarse el uso de las válvulas de ángulo.

1.509. *Drenes, respiraderos y aberturas para pruebas.*

Los drenes deben hacerse en los puntos más bajos, y los respiraderos en los puntos más elevados. Tanto el drene como el respiradero deben hacerse con acoplamientos de tubos de acero forjado de 6 000 lb, soldados a la tubería, unidos a un niple corto de cédula 160 y utilizando válvula de compuerta de ¾ plg, de acuerdo a las especificaciones de la tubería. En los sistemas a temperatura elevada, tanto los drenes como los respiraderos deben hacerse con tubos de 1½ plg tamaño nominal. Para estas conexiones se usa tapón* de acero de forma hexagonal y con rosca para acoplarse a la válvula. Todos estos tapones deben extenderse por lo menos 3 plg más adelante de la porción roscada.

Las conexiones de prueba para usos futuros en las tuberías o depósitos, deben fabricarse en igual forma que los drenes y respiraderos; la excepción son las válvulas, las que podrán omitirse taponando la conexión. Los tapones que se instalan antes del embarque, deben después quitarse y reemplazarse por tapones hexagonales como los descritos anteriormente. Para las tuberías que tienen aislamiento, los tapones deben sobresalir del aislamiento.

1.510. *Conexiones a servicios y tuberías de servicio.*

Deben proporcionarse mangueras de ¾ de plg (tipo pesado) para conectarse a vapor, aire o agua en los puntos donde se necesite hacerlo. Las líneas y tubos de servicio para depósitos verticales se instalan por un lado del depósito y por fuera del aislamiento, pero no por fuera de las plataformas de las torres.

1.511. *Conexiones para manómetros e instrumentos de presión.*

Las conexiones utilizadas para los instrumentos que registran las presiones en la descarga de una bomba, deberán localizarse en la tubería de descarga, entre la brida de la bomba instalada cerca de la bomba y la primer válvula. Si se desean registros en otros puntos, deberá especificarse en los dibujos. Todos los puntos de registro deben ser accesibles. Para tener acceso a los puntos de prueba, en algunos casos podrá utilizarse una escalera. Para efectuar el purgado de tuberías con fluidos a temperatura elevada, se utiliza válvula de bloque doble (dos válvulas); la válvula de purga queda localizada entre las dos válvulas de bloque. El tamaño de los instrumentos para efectuar el purga-

* El tapón consiste de una pieza de acero al carbono, construida a partir de una barra hexagonal, con rosca en un extremo, para conectarse a tubo ordinario. Los llamados tapones ciegos, con frecuencia se aplastan durante el apriete, siendo esto muy perjudicial para el acoplamiento y para la rosca.

do, no necesariamente será igual al de las tuberías de drene y respiración, pero para servicios a temperatura elevada, el diámetro nominal de las tuberías no debe ser menor a ½ plg, y la instalación debe ser en tal forma que permita darle movimiento a la válvula y a sus accesorios mediante una varilla de extensión. Las tuberías de purgado que conducen fluidos a temperatura elevada, pueden incendiarse estando expuestas al aire, de modo que deberán instalarse en forma de serpentinas enfriadas con chaquetas de agua. El purgado de tuberías elevadas que utilizan tubo de vidrio deberá desembocar hasta cerca del lugar del drenaje abierto, debiendo ser visible el líquido que sale por la válvula.

Deben mostrarse en los dibujos los detalles de las conexiones y los arreglos de las válvulas de conexión de los instrumentos.

1.512. *Pozos térmicos, pozos de prueba, bridas de orificio e instrumentos varios.*

Debe indicarse en los dibujos la localización de los puntos donde deban determinarse las temperaturas y la posición de las bridas de orificio.

En el dibujo del instrumento deben mostrarse los accesorios y los arreglos necesarios para efectuar la instalación. Todas estas instalaciones deben efectuarse en la obra, a menos que se estipule lo contrario. Las bridas de orificio deben instalarse exactamente en los lugares indicados en los dibujos. Los pozos térmicos deben ser accesibles y prácticos.

1.513. *Trampas de vapor.*

En los dibujos esquemáticos de las trampas de vapor debe mostrarse el montaje de trampas de vapor típicas o especiales, e identificarlas con el número de la trampa. En los dibujos de la tubería debe indicarse la posición de la trampa mediante un símbolo y un número.

1.514. *Curvas de expansión.*

Las curvas de expansión se utilizan cuando, a pesar de los cambios de dirección y elevación de la tubería, no es posible reducir los esfuerzos producidos por las expansiones o contracciones a los valores asignados en el Código. Estas curvas para tubos de seis pulgadas y diámetros mayores, se construyen con accesorios soldados. No se utiliza el preestirado en frío.

En general, todas las curvas de expansión se localizan en un plano vertical en vez de hacerlo en un plano horizontal. Las curvas pueden colgar hacia abajo, detenidas en soportes y fabricadas completamente con accesorios soldados, por ejemplo con dos codos de 90° o uno de 180° o cuatro codos de 90° de radio de curvatura grande, todos ellos soldados. Las juntas de expansión son diseñadas para soportar un esfuerzo máximo igual a 75% del esfuerzo estipulado en el Código.

1.515. *Tuberías para bombas, compresores y turbinas.*

1.5151. *Bombas.*

Deben instalarse válvulas de retención en las tuberías de descarga de todas las bombas centrífugas, aguas arriba de la primera válvula de bloque.

1.5152. Los cedazos temporales deben fabricarse a máquina, usando lámina metálica perforada, de espesor mínimo $1/16$ plg para tubos hasta de 8 plg tamaño nominal, y de espesor mayor de $1/8$ plg para tubos de más de 8 plg de diámetro.

1.5153. Las bombas y tuberías deben disponerse de tal manera que haya un espacio mínimo de 2′6″ entre bombas adyacentes. También debe dejarse un corredor por el lado de los motores, de un ancho mínimo de 5′0″. Debe

disponerse de espacio adecuado para dar cabida a las partes reciprocantes de la máquina cuando sea necesario hacerle reparaciones.

1.5154. Las tuberías de succión y descarga deben disponerse de acuerdo a las normas del Instituto de Hidráulica. Las bombas de agua deben instalarse tan cerca como sea posible del lugar de la succión; de otra manera deberán suministrarse válvulas de aspiración y sistemas de eyector e inyector.

1.5155. Las conexiones que se hagan con tuberías expuestas a temperaturas elevadas como las que se encuentran en algunas bombas y turbinas, deben anclarse en tal forma que eliminen la posible transmisión de esfuerzos al equipo.

1.5156. Las conexiones de las tuberías que pasan por encima de un equipo deben disponerse de tal modo que no estorben el funcionamiento del mismo. Debe proveerse el espacio adecuado para mover con grúa al equipo cuando se hagan reparaciones y mantenimiento. (Véase 1.603.)

1.5157. Deben mostrarse en los dibujos los sistemas de lubricación, el sello del collarín del prensaestopas y las tuberías de diámetro pequeño utilizadas para enfriamiento con agua; esto para evitar posibles errores en las conexiones.

1.5152. *Compresores.*

Las tuberías para compresores deben instalarse de tal modo que se eviten vibraciones cíclicas o excesivas. (Véase 1.5157 para los sistemas de agua y lubricación con aceite.)

1.5153. *Turbinas*

Deben proporcionarse juntas de expansión en el escape de las turbinas, y en las tuberías que conducen vapor al equipo. Véase 1.5157 para los sistemas de agua y lubricación con aceite.

1.516. *Líneas de vapor, extracción y condensado.*

Todas las tuberías para vapor saturado y vapor de extracción, deberán instalarse con una determinada pendiente. Deben instalarse tubos de desagüe y trampas de vapor en todas las uniones de tuberías y en los demás puntos en los que se considere necesario.

Deben instalarse trampas de vapor en todas las curvas de expansión verticales. Las descargas de todas las trampas de vapor deben llevarse al cabezal de retorno del condensado más próximo, excepto las que se especifiquen en los dibujos.

La tubería principal de vapor debe instalarse con cierta pendiente y deben instalarse tubos de desahogo para dar salida al condensado.

Las conexiones de vapor que se encuentren entre los cabezales y el equipo, deben utilizar una válvula de compuerta instalada en el tubo horizontal del cabezal, y una válvula de globo adyacente al equipo. Estas válvulas se instalarán independientemente de las válvulas de control. Las conexiones en el escape deben proveerse con válvula de compuerta adyacente al equipo. No se deben tener válvulas de bloque en la extracción de los cabezales de vapor. Tanto para las tuberías de alimentación como para las de extracción deberá disponerse de tubo de ½ plg tamaño nominal mínimo para desalojar al condensado hacia la caja de drenado más próximo. Estas tuberías no deben quedar sumergidas en el líquido ni llegar hasta el fondo de la caja de drenado.

1.600. *Fabricación y accesorios.*

1.601. *Tubos fabricados en el taller y en la obra.*

Todos los tubos de 4 plg o más deberán adaptarse en el taller utilizando accesorios soldados (en caso de algún proyecto extranjero, a veces resulta más económico su fabricación en el taller, aun para tubos de tamaño de

2 plg, utilizando, además, mano de obra americana). Para todos los tubos de 3 plg fabricados en la obra deberán emplearse accesorios soldados. Todas las tuberías de 2 plg (o 2½ plg si se le usa) o menos, deberán ser adaptadas usando accesorios atornillados. En ciertos casos puede resultar más práctico usar accesorios soldados y no atornillados; esto sólo para tubos de 2 plg. Debe indicarse claramente en los dibujos los casos en que se usará soldadura (solamente para tuberías de 2 plg). Las tuberías galvanizadas deben instalarse con elementos roscados. No debe emplearse soldadura en tubería galvanizada.

1.602. *Cambios de dirección.*

1.6021. En donde sean posibles los cambios de dirección de tuberías atornilladas o roscadas, deberán hacerse flexionando el tubo (véase 1.507); de otro modo se deben emplear accesorios roscados como se indica en el 1.601.

1.6022. Los cambios de dirección de tubería soldada ordinariamente se hacen utilizando codos sin costura, soldados a tope. También se puede flexionar el tubo, dependiendo ello de la especificación, el servicio o la aplicación. (Véase 1.507.) El flexionado de tubo de 6 plg o de diámetro mayor, se considera como caso especial y debe pedirse autorización para su ejecución.

1.603. *Accesorios bridados y carretes.*

Los accesorios bridados deben usarse lo mínimo posible. Se pueden proporcionar con el equipo carretes cortos bridados (véase 1.200) para tuberías de 4 plg, las que pueden emplearse para cuando se requiera hacer cambios o reposiciones en la tubería. En las instalaciones de bombas y turbinas que tengan juntas de expansión, el uso del carrete queda eliminado para efecto de reposición de algún tubo. Véase 1.5156.

1.604. *Reductores.*

Los cambios, en cuanto a diámetro, en tuberías roscadas, se efectúan solamente con accesorios reductores roscados de acero forjado, excepto para las válvulas de control en las que se pueden usar niples estampados roscados (solamente sin costura). Para tuberías soldadas o bridadas sólo se usan reductores sin costura, soldados a tope. La Te roscada se usa solamente como accesorio de reducción.

1.605. *Conectores para los ramales.*

Las conexiones a ramales para tuberías adaptadas en el taller, pueden hacerse sin necesidad de usar accesorios soldados a tope, siempre que estén debidamente reforzados de acuerdo a los requerimientos del Código. Para las conexiones de ramales adaptados en la obra, deberán usarse accesorios soldados a tope. Deben emplearse bridas para las conexiones reductoras usadas con los ramales.

Las conexiones que se hagan en los tubos de distribución, deberán hacerse con uniones de acero forjado de 6 000 lb, las que se colocan soldadas al tubo. Todas las conexiones deben hacerse conforme a las normas del Código. Las tuberías más grandes (mayores que las roscadas) pueden soldarse directamente dentro de los cabezales de los distribuidores. No deben usarse niples de extremo roscado soldados en tubos con protuberancias.

1.606. *Longitud máxima (para efectos de embarque)*

No deben fabricarse en el taller elementos de tuberías que tengan longitud mayor a 40′0″, ni piezas que tengan más de nueve pies (9′) de ancho o alto, aunque se tenga cierta limitación indicada en los dibujos. Se sobreentiende

que para. trabajos de soldadura en la obra podrán excederse los valores antes mencionados.

1.607. *Bridas para conexión y bridas ciegas.*

Se instalan bridas en las tuberías que están fuera de los límites del área de proceso solamente en los lugares seleccionados. Debe eliminarse o bien utilizarse el menor número de bridas. En particular, para tuberías que conducen vapor, el número de bridas a usar debe de ser mínimo. Todas las tuberías que se usan como cabezales, deben tener en su extremo final una brida ciega.

1.608. *Codos soldados a tope.*

Los codos de 90° soldados a tope deben ser de radio largo. En los dibujos deberán indicarse los lugares en donde hayan excepciones.

1.700. *Pruebas.*

1.701. *Pruebas en la obra.*

Todas las tuberías, después de su instalación pero antes de la colocación del aislamiento, deberán sujetarse a una prueba hidrostática, de la siguiente manera:

1.7011. Cada sección de la tubería debe ser probada hidrostáticamente a una presión igual a dos (2) veces la presión de operación mínima a que están estipulados los accesorios, las válvulas y las bridas de la tubería; pero en ningún caso esta presión deberá ser menor a una y media veces la presión normal de trabajo. (Para ciertos hidrocarburos y procesos químicos deberá eliminarse el agua de cualquier parte del sistema, antes de empezar a operar. Estos procesos no pueden probarse con agua ya que pudiera necesitarse desarmar por completo al sistema a fin de eliminar completamente el agua, con lo que se nulificaría la prueba. Debe usarse algún otro fluido para efectuar la prueba. No debe usarse aire con el fluido porque éste pudiera arrastrar agua o aceite lubricante como contaminante. Todos estos requisitos deben estipularse antes de usar un determinado fluido.)

1.7012. La presión de la prueba no debe ser mayor a una y media veces la presión de trabajo máxima admisible, dada por el Código o determinada de acuerdo a los requisitos de las pruebas estipuladas en él mismo.

1.7013. La presión de la prueba hidrostática no debe ser mayor que la presión máxima admisible de la pieza más débil del equipo instalado en la tubería. En general, debe separarse de la prueba hidrostática al equipo principal, tal como depósitos, cambiadores de calor, bombas y compresores. Cuando sea necesario hacer la prueba hidrostática a cambiadores de calor y depósitos, éstos deberán conectarse a la tubería y aplicar las presiones de prueba especificadas para el equipo.

1.7014. La presión manométrica mínima de la prueba hidrostática debe ser de valor 100 lb/plg^2.

1.7015. El siguiente equipo debe ser excluido de la prueba general hidrostática, pero debe probarse con aire comprimido (y espuma de jabón) a una presión igual a la presión de trabajo admisible en el equipo y en las tuberías, o igual a la presión máxima del aire comprimido, considerando el valor mínimo admisible de los equipos correspondientes.

1.70151. Líneas de aire a los instrumentos.

1.70152. Válvulas que se instalan con motores neumáticos.

1.70153. Partes expuestas a presión de los instrumentos usados para servicios de vapor o gas. Sin embargo, las demás partes de los instrumentos deberán sujetarse a la presión hidrostática general, excepto cuando la prueba

de presión exceda a la presión normal de trabajo, en cuyo caso debe aislarse el instrumento.

1.70154. Líneas de aire para la planta.

1.70155. Tuberías de gas y combustible para la planta.

1.7016. Las válvulas de desahogo deben excluirse de la prueba hidrostática. Debe instalarse un cortador de flujo entre la válvula de desahogo y las secciones del tubo donde va a hacerse la prueba hidrostática.

1.7017. Debe extraerse todo el aire que tenga la tubería, si para la prueba hidrostática se usa agua o algún otro fluido.

1.7018. Las tuberías y el equipo que están sujetos a la prueba de la presión hidrostática, deberán estar bajo presión durante un tiempo suficiente con el fin de inspeccionar si hay fugas o algunos defectos.

1.7019. Todas las tuberías, anclajes y codos macho y campana instalados bajo tierra, deberán probarse adecuadamente a fin de evitar fugas posteriores.

1.7020. *Pruebas en el taller.*

Todas las tuberías bridadas de acero al carbono fabricadas en el taller, las cuales van a exportarse, deben probarse hidrostáticamente antes de efectuar su embarque, a una presión igual a dos veces la presión que la ASA especifica para las bridas de la pieza que va a probarse. De igual forma deben probarse las tuberías de aleación o las tuberías que fueron expuestas a algún tratamiento térmico, y que fueron construidas en el taller, ya sea que estas piezas sean para exportación o no.

Las tuberías de acero al carbono sin bridas se sujetarán a la prueba solamente después de su erección, no debiéndose efectuar pruebas en el taller.

Todas las pruebas que se efectúen en el taller, deben hacerse en presencia de un inspector o de algún representante del comprador.

1.800. *Especificaciones para tubos.*

1.8010. Especificación M.

Esta especificación se aplica a los siguientes servicios:

A Aire de 100 lb
C Caústica de 50 lb
SC Condensado de 15 lb
F Combustible de 50 lb
H Hidrocarburos de 150 lb
SE Extracción de 40 lb

Clasificación:

230 lb/plg² a 100°F
150 lb/plg² a 500°F
100 lb/plg² a 750°F (máximo)

1.8011. *Tubos.*

Material acero al carbono sin costura, de longitudes irregulares, P. E. para tubos de 2 plg o menos, para 3 plg o diámetro mayor deben biselarse para soldarse conforme a la especificación ASTM-A 53 grado A, de acuerdo a la última revisión.

2 plg y diámetros menores, cédula 80 (pueden ser ASTM-A 106 o A 83 si no se consigue el A 53).

3 A 10 plg, cédula 40.

1.8012. *Bridas.*

De acero al carbono forjado ASA 150 lb con collar soldado, saliente de la cara 1/16 plg conforme a la última especificación A 181 de la ASTM, clase

I, 0.35% máximo de carbono. Nota: Todos los agujeros de las bridas de collar soldado tienen el mismo diámetro interior del tubo en el que van a usarse.

1.8013. *Accesorios.*

1½ plg y diámetro menor. Tipo roscado, acero al carbono forjado CWP 3 000 lb.

2 plg y diámetro mayor. Tipo soldado a tope, acero al carbono sin costura, conforme a las especificaciones de la ASTM A 234 y A 106, grado A, última revisión. El diámetro interior y el espesor de la pared son del mismo valor que los del tubo en que van a usarse.

2 plg y diámetro mayor. Tipo bridado, ASA 150 lb.estándar, acero al carbono fundido, saliente de la cara 1/16 plg.

Accesorios bridados de acero fundido. Ordinariamente no se usan.

1.8014. *Uniones.*

1½plg. y diámetro menor. Acero al carbono forjado CWP 2 000 lb, uniones roscadas con asientos de acero.

2 plg y diámetro mayor. Utilizar las bridas especificadas anteriormente.

1.8015. *Bujes y tapones.*

1½ plg y diámetro menor. Bujes hexagonales de acero y tapones de barra hexagonal de acero. Usar reductores donde la reducción es mayor de dos tamaños.

1.8016. *Material para pernos.*

Tornillos opresores de aleación de acero, véase 1.901.

1.8017. *Empaques.*

De asbesto rellenado con doble enchaquetado de hierro acanalado, excepto para las especificaciones A y SC en las que se usan empaques anulares de hojas de asbesto.

1.80181. *Válvulas de compuerta.*

1½ plg y diámetro menor. Acero al carbono forjado SWP 600 lb, roscadas, vástago atornillado interiormente, cubierta acabada de acero inoxidable, 11-13% cromo (V 35). Nota: para las especificaciones A y SC, véase 1.80381.

2 plg y diámetro mayor. Acero al carbono fundido ASA 150 lb, O. S. & Y, acabado de acero inoxidable 11-13% cromo; saliente de la cara 1/16 plg (V1). Nota: para la especificación SC, véase 1.80381.

1.80182. *Válvulas de globo.*

1½ plg y diámetro menor. Acero al carbono forjado SWP 600 lb, roscadas, vástago atornillado interiormente, cubierta acabada de acero, inoxidable, 11-13% cromo (V34). Nota: para las especificaciones A y SC véase 1.80382.

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono fundido ASA 150 lb, bridadas, O. S. & Y., saliente de la cara 1/16 plg, acabado de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V2). Nota: para la especificación SC, véase 1.80382.

Nota: para tamaños mayores a 6 plg usar válvulas de compuerta.

1.80183. *Válvulas de retención*

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono forjado SWP 600 lb, roscadas, horizontales, tipo pistón, acabado de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V19). Nota: para las especificaciones A y SC, véase 1.80383.

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono fundido estándar 150 lb ASA; saliente de la cara 1/16 plg, tipo giratorio, acabado de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V19). Nota: para especificación SC, véase 1.80383.

1.80184. *Válvulas macho.*

Tamaño ¼ plg. Acero al carbono forjado WOG 2 000 lb, roscadas, lubricadas, macho de paso (V 110).

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono fundido WP 300 lb, roscadas, operadas con llave, macho lubricado (V58).

Tamaños de 2 a 6 plg. Acero al carbono fundido ASA estándar 150 lb, bridas, saliente de la cara $1/16$ plg, operada con llave, macho lubricado (V54).

1.8020. *Especificación N.*

Esta especificación se aplica a los servicios S, HA, HB, HC, procesos de aceite y vapor, de 300 *lb y vapor de* 275 *lb*:

Clasificación: 500 lb/plg² @ 100°F.
375 lb/plg² @ 500°F.
300 lb/plg² @ 750°F.

1.8021. *Tubo*

Acero al carbono sin costura, longitudes irregulares, P. E. para diámetros de 2 plg y menores, para tubos de 3 plg o diámetros mayores extremos biselados para soldaduras conforme a la especificación de la ASTM A106 grado A, última revisión.

10 plg y diámetros menores. Cédula 80.
12 plg y diámetros mayores. Pared de 0.375 plg.

1.8022. *Bridas.*

Acero al carbono forjado, ASA 300 lb collar soldado, cara saliente de 1/16 plg de acuerdo a la última revisión de la ASTM-A181. Clase I, 0.35% máximo de carbono, excepto para HC; utilizar bridas refrentadas RTJ.

Nota: El agujero de todas las bridas de collar soldado tienen el mismo diámetro interior que el tubo en el que van a usarse.

1.8023. *Accesorios.*

1 ½ plg y diámetros menores. Tipo roscado, véase 1.8013.
2 plg y diámetros mayores. Tipo soldado a tope, véase 1.8013.

Nota: Accesorios bridados de acero fundido; ordinariamente no se usan.

1.8024. *Uniones.*

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono forjado CWP 2 000 lb, roscadas, véase 1.8014.

2 plg y diámetros mayores. Usense las bridas especificadas anteriormente.

1.8025. *Bujes y tapones.*

1 ½ plg y diámetros menores, véase 1.8015.

1.8026. *Material para pernos.*

Tornillos opresores de aleación de acero, veáse 1.901.

1.8027. *Empaques.*

De asbesto rellenado con hierro acanalado, excepto para la especificación HC para la que se usa anillo octagonal de acero al carbono, de dureza Brinell 90.

1.8028. *Válvulas.*

1.80281. *Válvulas de compuerta.*

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono forjado SWP, 600 lb, roscadas, vástago atornillado interiormente, cubierta acabada de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V35).

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono fundido ASA 300 lb, bridadas, O. S. & Y., acabado de acero inoxidable, 11-13% de cromo, saliente de la cara 1/16 plg (V4).

1.80282. *Válvulas de globo.*

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono forjado SWP 600 lb, roscadas, vástago atornillado interiormente, cubierta acabada de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V34).

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono fundido ASA 300 lb, bridadas, O. S. & Y., saliente de la cara 1/16 plg, cuerpo de acero inoxidable 11-13% de cromo (V5).

Nota: Usense válvulas de compuerta para tamaños mayores de 6 plg.

1.80283. *Válvulas de retención.*

1 ½ y diámetros menores. Acero al carbono forjado SWP 600 lb, roscada, horizontal, tipo de pistón, acabado de acero inoxidable 11-13% de cromo (V19).

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono fundido ASA 300 lb, saliente de la cara 1/16 plg, tipo bisagra, acabado de acero inoxidable, 11-13% de cromo (V6).

1.80284. *Válvulas de macho.*

Tamaño ¼ plg. Acero al carbono forjado WOG 2 000 lb, roscadas, macho de paso lubricado (V110).

1 ½ plg y diámetros menores. Acero al carbono fundido WP 300 lb, roscadas, operadas a llave, macho de paso lubricado (V58).

Tamaños de 2 a 4 plg. Acero al carbono fundido ASA 300 lb, bridadas, saliente de la cara 1/16 plg, operadas a llave, macho de paso lubricado (V59).

1.8030. *Especificación P.*

Esta especificación se aplica a los servicios, W, WC, WS, WF:

WF agua contra incendio 100 lb.
W agua de servicio 75 lb.
WC agua de enfriamiento 75 lb
WS agua sanitaria 45 lb

Clasificación: 125 lb/plg² @ 150°F.

Nota: Todos los tubos y accesorios para el servicio WS deben ser galvanizados.

1.80311. *Tubos de alto grado.*

Acero al carbono sin costura, longitudes irregulares, P. E. para tamaños de 2 plg y diámetros menores, extremos biselados para tubos de 3 plg o diámetros mayores que van a soldarse conforme a la última revisión de la especificación A53 grado A de la ASTM; esto solamente para tubos de alto grado. Para WS usar ASTM A120 galvanizado.

2 plg y diámetros menores. Cédula 80, excepto para WS que puede ser cédula 40.

3 a 10 plg. Cédula 40.
12 a 20 plg. Tubo de pared igual a 0.375 plg.
24 plg y diámetros mayores. Pared de 0.250 plg, sin costura o soldado.

1.80312. *Tubo de bajo grado.*

2 plg y diámetros menores. Igual que lo expresado anteriormente, a excepción del tubo galvanizado.

3 plg y diámetros mayores. Tubo de hierro fundido, uniones mecánicas de acuerdo con ASA-A21.6 u 8, Clase 22.

1.8032 *Bridas.*

Acero al carbono forjado ASA, collarín soldado 1/16 plg, cara resaltada excepto para el caso de bridas planas cuando se usan con válvulas de hierro fundido de caras planas, accesorios y equipo. Las bridas se construyen conforme a la especificación A181 de la ASTM, última revisión, clase I 0.35% máximo de carbono. Solamente para tuberías de acero.

Nota: El agujero de todas las bridas de collarín soldado tiene el mismo diámetro interior del tubo en el que van a usarse.

1.80331. *Accesorios de alto grado.*

1 ½ plg y diámetros menores. Hierro maleable estándar 300 lb, roscadas, galvanizadas para los servicios WS hasta de 2 plg de diámetro.

2 plg y diámetros mayores. Acero al carbono sin costura, tipo soldado a tope, conforme a las especificaciones A234 y A106 de la ASTM última revisión, grado A, del mismo diámetro interior y espesor del tubo en el que van a usarse.

2 plg y diámetros mayores. Tipo bridado. Hierro fundido estándar ASA clase 125.

1.80332. *Accesorios del tamaño requerido, grado bajo.*

Clase 150, accesorios para juntas mecánicas, teniéndose las mismas dimensiones que para accesorios bridados estándar clase 125.

1.8034. *Uniones.*

1 ½ plg y diámetros menores. Hierro maleable estándar 300 lb, roscados, unión a tierra, asientos de hierro o latón.

2 plg y diámetros mayores. Usar las bridas especificadas anteriormente o las juntas mecánicas para tubo de hierro fundido de acuerdo a la especificación ASA A 21.11.

1.8035. *Bujes y tapones.*

Bujes y tapones de acero hexagonal. Usar reductores cuando se tengan reducciones en más de dos tamaños. Nota: todos los cambios de hierro fundido deberán efectuarse con piezas de hierro fundido bridadas, conectadas a uniones o juntas mecánicas.

1.8036. *Pernos.*

Tornillos máquina de cabeza cuadrada de acero al carbono estándar, con tuercas de acero semiacabadas, para tuberías de acero. El material para los pernos debe suministrarse con las tuberías de hierro fundido de acuerdo a la especificación ASA-A 21-11.

1.8037. *Empaques.*

De asbesto comprimido de un 1/16 plg de espesor. Para juntas de cara resaltada usar empaques de anillo, y para juntas de cara plana, empaques de cara completa. Pueden usarse empaques de hule para tubos de hierro fundido.

1.8038. *Válvulas.*

1.80381. *Válvulas de compuerta.*

1 ½ plg y diámetros menores. Bronce SWP 150 lb, roscadas, vástago saliente atornillado interiormente (V47).

2 plg y diámetros mayores. Hierro fundido estándar ASA 125 lb, bridadas, O. S. & Y., acabado de bronce; y vástago (V26).

2 plg y diámetros mayores. Hierro fundido estándar ASA 125 lb, bridadas, O. S. & Y. (sólo de doble disco para servicios de contraincendio, vástago corto y acabado de bronce) (V117).

1.80382. *Válvulas de globo.*

1 ½ plg y diámetros menores. Bronce SWP 250, roscadas, vástago elevado, cubierta de unión (V51).

2 plg y diámetros mayores. Usense válvulas de compuerta.

1.80383. *Válvulas de retención.*

1 ½ plg y diámetros menores, Bronce SWP 250 lb, roscadas, tipo pistón horizontal, asiento y disco de aleación de níquel (V101).

2 plg y diámetros mayores. Hierro fundido estándar ASA 125 lb, bridadas, tipo bisagra, acabado de bronce (V28).

1.80384. *Hidrantes de incendio.*

Hidrantes tipo planta con conexiones para dos mangueras (VF).

1.8040. *Especificación Q.*

Esta especificación se aplica solamente para el servicio AC:
Aire seco para instrumentos, 50 lb.
Capacidad 125 lb/plg² @ 150°F.

1.8041. *Tubo.*

Acero al carbono sin costura conforme a la especificación A 53, grado A, de la última revisión ASTM, galvanizado. ASTM-183 adecuado para 2 plg y diámetros menores.

2 plg y diámetros menores. Cédula 80.
3 a 10 plg. Cédula 40.

1.8042. *Bridas.*

Hierro fundido, ASA 125 lb, roscadas, cara plana, galvanizadas.

1.8043. *Accesorios.*

2 plg y diámetros menores. Tipo roscado, hierro maleable estándar 300 lb, galvanizado y roscado.

3 a 6 plg y diámetros mayores. Tipo bridado, hierro fundido ASA 125 lb. Nota: usar bridados o roscados según se requiera.

Nota: debe usarse la mínima cantidad de accesorios bridados de hierro fundido.

1.8044. *Uniones.*

2 plg y diámetros menores. Acero al carbono forjado CWP 2 000 lb, roscadas, juntas y asientos de acero integral.

3 plg y diámetros mayores. Pueden usarse las bridas especificadas anteriormente.

1.8045. *Bujes y tapones.*

1 ½ plg y diámetros menores. Bujes hexagonales de acero y tapones de barra de acero de forma hexagonal. Usar reductores en donde se tengan reducciones en más de dos tamaños.

1.8046. *Pernos.* Tornillos máquina de acero al carbono, véase 1.901.

1.8047. *Empaques.* Empaques de asbesto comprimido de 1/16 plg.

1.8048. *Válvulas.* Véase 1.8038 para especificación de válvulas.

1.8050. Especificación Z.

Esta especificación se aplica solamente para dar servicio a instrumentos. Véase servicios a líneas para la clasificación de servicios a instrumentos.

1.8051. *Tubo.*

Tuberías para servicio a los instrumentos que conducen fluidos para los mismos; deben tener las mismas o aun mejores especificaciones que las tuberías de servicio. Para la primera válvula de bloque, deben usarse niples de cédula 160 y donde se tengan posibilidades de cualquier peligro o riesgo de la tubería. Debe evitarse que haya ramales muy largos con tuberías de diámetro pequeño, pero donde esto sea necesario deberá instalarse el soporte estructural necesario. Las tuberías para instrumento que tengan más de 25 pies de largo, deberán ser autorizadas antes de su instalación.

1.8052. *Tuberías de diámetro pequeño.*

Deben usarse tuberías de cobre si el fluido que se conduce es *aire.* Todas las tuberías deben ser de ¼ plg de diámetro exterior, pared de 0.032 plg de espesor ASTM B68, estirado en frío y recocido al vacío.

1.8053. *Accesorios.*

Deben usarse accesorios tipo acampanado para todas las tuberías de cobre.

1.8054. *Válvulas.*

Las válvulas que se usan con las tuberías de los instrumentos deben tener las mismas especificaciones que las de la tubería de servicio.

1.9000. *Especificaciones varias.*

1.9010. *Pernos de aleaciones de acero.*

Deben proporcionares pernos de aleación de acero para los servicios S, H, HA, HB y HC conforme a la ASTM-A193 grado B7, ajuste Clase 7 para tornillos, ajuste Clase 2B para tuercas, con dos (2) tuercas hexagonales de la serie pesada. Las tuercas deben ser de acuerdo a la ASTM especificación A194, última revisión, Clase 2H, templadas en aceite, forjadas en caliente. Todos los demás pernos deben ser conforme a la ASTM-A307 con ajuste Clase 2A para tornillos y 2B para tuercas, con excepción de los pernos para el servicio *W*, los que deben satisfacer los requisitos de la ASA-A21.11.

1.9020. *Limpieza y pintura.*

1.9021. Después de la erección, todas las tuberías deben limpiarse internamente, sacándoles toda la materia extraña que tengan en su interior; esto de-

be hacerse antes que la planta empiece a trabajar. Deben limpiarse cuidadosamente todas las tuberías que conducen aire a las válvulas de control de diafragma, actuadas por aire, antes que éstas sean conectadas, y después de la conexión limpiar también hasta el último de los accesorios que están antes del instrumento o válvula.

1.9022. Todas las tuberías de acero de 3 a 10 plg adaptadas en el taller para ser instaladas bajo tierra (soterradas), deberán cubrirse exteriormente y aplicarles el siguiente tratamiento:

a). Limpieza con chorro de arena.
b). Aplicarle una capa de bitumástico para tapado de poros.
c). Aplicarle una primera capa de esmalte bitumástico.
d). Aplicarle una segunda capa de esmalte bitumástico.
e). Envolverlo con una capa de fieltro de asbesto de 15 lb.
f). Envolverlo con una capa de papel kraft de 60 lb.

1.9023. Todas las tuberías de acero para ser instaladas bajo tierra (soterradas) deberán limpiarse exterior e interiormente y aplicarles el siguiente tratamiento:

Especificaciones interiores (para tubos de 12 plg y diámetros mayores)

a). Limpieza con chorro de arena.
b). Aplicarle una capa de bitumástico para tapado de poros.
c). Aplicarle una capa fuerte de esmalte bitumástico.

Las especificaciones para la parte exterior del tubo en cuanto a cubierta y envoltura son las especificadas arriba en el 1.9022 para tubos de 3 a 10 plg.

1.9030. *Materiales refractarios.*

Los soportes de los cabezales principales de vapor o de hidrocarburos, en las áreas que están sujetas a fuego, deberán ser protegidos con material refractario en las puntas de soporte, y deberán indicarse en los dibujos.

1.9040. *Trampas de vapor.*

Las trampas de vapor de cubo invertido deben proporcionarse para todos los servicios, excepto para aquellos que manejan cantidades pequeñas de vapor, para cuyo caso se pueden utilizar las trampas tipo impulso. Todas las trampas tipo cubeta deben tener cuerpo de acero fundido o forjado, con presiones de trabajo admisible de 600 lb/plg^2 como mínimo. Todas las demás trampas son de acero y su presión admisible debe ser al menos dos veces la presión que se tenga en la tubería.

REFERENCIAS

Nota: Se incluyen como referencia para información descriptiva, algunos catálogos de fabricantes. No debe considerarse que haya algo en contra de algunos fabricantes cuya información no aparezca aquí, ya que sería imposible incluir una lista completa de todos los catálogos excelentes que hay.

1. American Gas Association, 420 Lexington Ave., New York, N. Y. Estándares.
2. American Petroleum Institute. Estándares de Tubos, Bridas y Válvulas (API-5*A*, *B*, *F*, *G*-1, *G*-2, *G*-3 y *L*; API 600 *A* y *B*). American Petroleum Institute. Division of Production, 1205 Continental Bldg, Dallas 1, Texas.
3. American Society of Mechanical Engineers, 29 West 39th St., New York 18, N. Y.

4. Especificaciones de la American Standards Association. American Standards Association, 70 East 49th St., Nueva York, 17 N. Y. (La mayoría de los estándares listados más adelante están aprobados por la ASA y publicados por la ASME.)
   (*a*) A21.1-1939 Manual para el cálculo de la resistencia y espesor de tubos de hierro fundido.
   (*b*) A21.6-1953. Tubo de hierro fundido, fundido centrífugamente en moldes metálicos; tubos para agua u otros líquidos.
   (*c*) A21.8-1953. Tubo de hierro fundido, fundido centrífugamente en moldes de arena; tubos para agua u otros líquidos.
   (*d*) A21.10-1952. Accesorios de hierro fundido de cuerpo corto, 3 a 12 plg.
   (*e*) A21.11-1953. Especificaciones de juntas mecánicas para tubos de hierro fundido sujetos a presión.
   (*f*) B16b-1944. Bridas de hierro fundido Clase 250 y accesorios bridados.
   (*g*) B16.1-1948. Bridas de hierro fundido Clase 125 y accesorios bridados.
   (*h*) B16.3-1951. Accesorios roscados de hierro maleable, 150 lb.
   (*i*) B16.4-1949. Accesorios roscados de hierro fundido, 125 y 250 lb.
   (*j*) B16.5-1953. Bridas para tubos de acero y accesorios bridados.
   (*k*) B16.9-1951. Accesorios de acero, soldados a tope.
   (*l*) B16.10-1939. Dimensiones cara a cara de bridas ferrosas y válvulas con extremos soldados.
   (*m*) B16.11-1946. Accesorios de acero de boquilla para soldar.
   (*n*) B16.15-1947. Accesorios roscados de latón o bronce, 125 lb.
   (*o*) B16.17-1949. Accesorios roscados de latón o bronce, 250 lb.
   (*p*) B16.19-1951. Accesorios roscados de hierro maleable, 300 lb.
   (*q*) B16.20-1952. Empaques para bridas de anillo y ranura para tubos de acero.
   (*r*) B16.21-1951. Empaques no metálicos para bridas de tubo.
   (*s*) B31.1-1951. Código para tuberías de presión, incluyendo los suplementos B31.1-1955 y B31.1.8-1952.
   (*t*) B36.1 a 36.26. Especificaciones ASTM para tubos de acero y hierro aceptados como normas americanas.
5. American Water Works Association, 521 5th Ave., New York, N. Y., Normas
6. Clinedinst, W. O. *Oil and Gas Journal, 43,* Núm. 4, 79 (1945).
7. Catálogo Núm. 53 de la Compañía Crane. Crane Company, Chicago 5, Illinois.
8. Disertación técnica Núm. 409 de la Compañía Crane. Crane Company, Chicago 5, Illinois.
9. Crocker, Sabin, *Piping Handbook,* 4a. Ed., Rev., McGraw-Hill Book Co. New York, 1955.
10. *Equivalent Valves,* Equivalent Valves Co., 115 West 7th St., Los Angeles 14, California.
11. Especificaciones federales, Suplemento de Documentos, Washington 25, D.C.
12. Joffe, J., *Chem. Eng.,* 56, Núm. 8, 130 (1949).
13. Catálogo Núm. 55, Ladish, Ladish Co., Cudahy, Wisconsin.
14. Circulares Núms. 552, 553, 555 de la Lukenheimer. Lukenheimer Valve Co., Cincinnati 14, Ohio.
15. Manufacturer's Standardization Society of the Valve and Fitting Industry, 420 Lexington Ave., New York 17, N. Y.
16. Moody, L. F. *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.,* 66, 671 (1944).
17. Catálogo Núm. 10 de la Nordstrom Valve. Nordstrom Valve Division, Rockwell Manufacturing Company, 400 Lexington Ave. Pittsburgh 8, Pa.
18. *Piping Engineering,* Departamento de Investigación de la Tube Turns, Tube Turns Inc., Louisville 1, Kentucky (1947-53). Se tiene la siguiente serie:

1.01. Especificaciones y Códigos; fuentes de información para diseño de tuberías.
2.01. Materiales para tuberías y espesores; materiales para tubos y esfuerzos admisibles.
3.01. Flujo de fluidos; flujo de fluidos en tubos.
4.01. Expansión y flexibilidad; introducción a problemas de flexibilidad de tuberías.
4.02. Expansión y flexibilidad, *Z*, *L*, *U* y expansión de flexiones en *U*.
5.01. Juntas soldadas; preparación de las juntas para soldarlas a tope.
5.02. Juntas soldadas; anillos por soldar.
6.01. Juntas mecánicas, bridas de tubería de acero estándar.
6.02. Juntas mecánicas; clasificación de la American Standard Steel Pipe Flanges.

19. Poettmann, F. H. *J. Petroleum Tech.*, 3, 317 (1951).
20. Catálogo de la Powell Valve, Powell Valve Co., Wm: Powell Co., Cincinnati 22, Ohio.
21. Rase, H. F. *Petroleum Refiner*, 32, Núm. 8, 141 (1953).
22. *Catálogo de Refinería*, Gulf Publishing Co., 3301 Buffalo Drive, Houston, Texas, 1954.
23. *Estándares del Instituto de Hidráulica*, Hydraulic Institute, New York (1951).
24. *Estándares de la ASTM*. Parte I y II, Am. Soc. for Testing Materials, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. (1952).
25. *Catálogos* Núms. 484 y 423 *de la Taylor Forge*, Taylor Forge and Pipe Works, Chicago 90, Illinois.
26. *Catálogo* Núm. 211 *de la Tube Turns*, Tube Turns, Inc., Louisville 1, Kentucky.
27. Departamento de Comercio de los Estados Unidos; normas comerciales americanas y recomendaciones de prácticas simplificadas, Washington 25, D. C.
28. Especificación de la U. S. Navy, Departamento de Suministro de la U. S. Navy, Washington 25, D. C.
29. *Catálogo* Núm. F9 *de la Vogt Company*, Henry Vogt Machine Company, Louisville 10, Kentucky.
30. Vogrin, C. M., Frank C. G. Williams y John S. Worth. *Modern Steel Bolting for Piping and Pressure Vessels*, disertación 52 PET-7 ASME, 7a. reunión anual, Kansas City, Mo. (septiembre 22-24, 1952).
31. *Catálogo* Núm. 52 *de la Walworth*. Walworth Company, 60 E, 42nd St., New York 17, N. Y.
32. *Boletín* A3-50 *Watson-Stillman*, Watson Stillman Co., Roselle, N. J.
33. *Welding Handbook*, 3a. Ed., American Welding Society, New York, 1950.
34. Wert, H. A. y S. Smith, *Diseño de tuberías por flexibilidad usando gráficas de flex-Anal.*, Blaw Knox Co., Power Piping Div., Pittsburgh, Pa.
35. Personal de la M. W. Kellogg., *Desing of Piping Systems*, New York, John Wiley and Sons. (1956).

CAPITULO 19

AISLAMIENTO TERMICO

El aislamiento térmico, propiamente aplicado, asegura una operación efectiva del equipo de proceso y conserva el calor, con los beneficios económicos que ello implica. Para una situación dada, existe siempre una amplia variedad de materiales aislantes y a cada tipo se le debe dar una consideración cuidadosa para poder hacer una decisión inteligente. No es posible referirse a cada especie de material aislante, pero se describirán varios de los tipos más frecuentemente usados para plantas de proceso.

MATERIALES AISLANTES

Los materiales aislantes pueden ser clasificados en cuatro tipos: (1) fibrosos, (2) granulares, (3) celulares y (4) reflectores. En la práctica, no obstante, dichas clasificaciones a menudo tienen valor limitado puesto que los productos comerciales consisten en una combinación de varios de estos materiales aislantes.

Asbesto

El asbesto es un material que se presenta en la naturaleza, con la composición $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, correspondiente a un silicato hidratado de magnesio. En su estado natural parece roca, pero puede ser triturado y convertido en fibras suaves y sedosas. En este estado tiene la textura de la lana y, por consiguiente, en otras épocas confundía a la gente puesto que no sufre combustión alguna. El asbesto se usa en muchas formas para fabricar materiales aislantes, bien

sea por sí mismo o en combinación con otras sustancias. Mediante la adición de adhesivos puede ser configurado a una estructura como de papel, ya sea en capas planas individuales, con finos espacios de aire entre ellas, o bien como papel corrugado de asbesto, formado también en capas. Los espacios de aire relativamente vacíos sirven para disminuir la conductividad del aislamiento terminado. Estos aislamientos de papel de asbesto son efectivos hasta alrededor de unos 300°F (149°C); por encima de esta temperatura, el material adhesivo se descompone. Combinándolo con pequeñas partículas de algún material celular, esponjoso, el asbesto puede tomar una estructura afieltrada. Este asbesto afieltrado resiste la vibración y soporta el manejo rudo a temperaturas hasta de unos 900°F (482°C). Las fibras de asbesto se utilizan para fortalecer el aislamiento de alta temperatura de tierra de diatomáceas y el aislamiento a base de 85% de magnesia.

Tierra de diatomáceas

La tierra de diatomáceas es una forma poco usual de sílice; tiene un alto punto de fusión, 2930°F (1610°C), y propiedades exclusivas. Está constituida por pequeños esqueletos silicosos de diatomeas, las cuales fueron plantas microscópicas que vivieron hace millones de años. En California existen grandes depósitos. Una mezcla de asbesto y tierra de diatomáceas forma un excelente aislamiento para alta temperatura (600 a 1900°F, 315 a 1040°C) y dicha mezcla se fabrica bajo varios nombres comerciales.

Aislamiento a base de 85% de magnesia

Para temperaturas hasta de unos 600°F (315°C), el aislamiento a base de 85% de magnesia es quizá el material aislante más popular. Está constituido por 85% de magnesia y 15% de asbesto. La fibra de asbesto proporciona las cualidades de refuerzo necesarias para permitir el moldeo y la fabricación de secciones de tubo y otras formas. El compuesto llamado magnesia es, en realidad, un carbonato de magnesio producido, a partir de piedra caliza dolomítica, por la acción del bióxido de carbono sobre pizarra dolomítica. Cuando se instala apropiadamente, el aislamiento a base de 85% de magnesia conserva durante muchos años sus excelentes propiedades aislantes y resulta un material económico. Tiene la desventaja de no poder soportar carga apreciable alguna.

El aislamiento a base de 85% de magnesia a menudo se usa en combinación con aislamiento de tierra de diatomáceas. Adyacente al cuerpo caliente se coloca una capa de este último aislamiento, la cual debe tener un espesor suficiente para producir una temperatura de 600°F (315°C) en su superficie exterior. Esta capa se cubre luego por una capa de aislamiento a base de 85% de magnesia,

la cual tiene un menor valor de conductividad térmica y puede ser usada en el rango de temperaturas inferiores a 600°F (315°C).

El aislamiento de 85% de magnesia constituye un efectivo material aislante, porque el 90% de su volumen total es espacio de aire, cuya conductividad es baja.

Lana mineral

La lana mineral se fabrica soplando en forma de filamentos, minerales de sílice fundidos. Estos filamentos pueden ser convertidos en mantas aislantes o moldeados en bloques, por la adición de materiales adhesivos apropiados. Cuando se usa un adhesivo a prueba de agua, se puede producir un aislamiento efectivo de baja temperatura, el cual es altamente resistente a la humedad y a la putrefacción microbiana. Cuando está en dicha forma, el mencionado aislamiento por lo general se llama corcho mineral o roca mineral. La lana mineral también se usa para aislamiento de casas y edificios.

Corcho vegetal

El corcho natural contiene muchos miles de espacios sellados, llenos de aire. Es ligero, aunque resistente; no absorbe vapores ni es adversamente afectado por el humedecimiento. Estas propiedades hacen del corcho un buen aislamiento para bajas temperaturas.

Poliestireno expandido

El estireno, polimerizado y moldeado para ocluir muchas burbujas de aire, constituye un aislamiento para bajas temperaturas, ligero y servicial. Ha sustituido al corcho en muchas aplicaciones.

Aislamiento de vidrio

La baja conductividad térmica, incombustibilidad y nula reactividad química del vidrio, son características deseables en los aislamientos. El vidrio fundido puede ser hilado en fibras similares a las de la lana mineral y fibras que pueden convertirse en mantas, cubiertas moldeadas para tubos, o bloques. El aislamiento de fibra de vidrio generalmente es bueno hasta 600°F (315°C), aunque ciertos diseños especiales soportan 1000°F (538°C).

Puesto que el vidrio no puede absorber agua, las fibras de vidrio moldeadas a forma de cartón sirven como aislamiento de baja temperatura cuando se surten con un sello apropiado de vapor para el lado caliente (véase más adelante). El material aislante a base de vidrio celular se hace de miles de burbujas de vidrio moldeadas en estructuras rígidas, de peso en extremo ligero. Este material de vidrio celular es adecuado para temperaturas de −350 a +800°F (−177°C

a +425°C). Está disponible en bloques y en formas para cubiertas de tubos.

Aunque no es un vidrio, hay otro material aislante, llamado silicato de calcio hidratado, que se hace de materiales muy similares al vidrio. Este material es efectivo hasta temperaturas de 1200°F (650°C) y es resistente a la humedad. Cuando se mezcla con pequeñas cantidades de fibra de asbesto, su resistencia aumenta.

Thomas y Turner[11] han preparado una tabla con las características de los materiales aislantes anteriores y algunos otros de importancia comercial. Este resumen, reproducido en la Tabla 19-1, es notable por su objetividad. Se ha evitado el uso de nombres comerciales.

Aislamiento reflector

En el espacio de aire delimitado por dos cuerpos sólidos, el calor se transmite por medio de radiación, convección y conducción. Si la anchura del espacio de aire es apropiadamente seleccionada y la caída de temperatura a través de dicho espacio se mantiene cerca de cierto valor óptimo, la convección será despreciable. La transmisión de calor por conducción a través del aire es bastante reducida, debido a la baja conductividad térmica del aire. Por consiguiente, la transmisión de calor puede ser reducida a un mínimo construyendo un material aislante con láminas metálicas paralelas, separadas por espaciadores colocados a distancias lo suficientemente pequeñas a manera de que la transmisión por convección sea despreciable. El metal debe tener baja emisividad y por tanto alta reflexividad con objeto de que la transmisión de calor por radiación sea también baja. El aislamiento así construido se denomina aislamiento reflector.

Este tipo de aislamiento se ha popularizado bastante en el aislamiento de edificios y en almacenamiento frío, y está siendo gradualmente aceptado en las industrias de proceso. La anchura deseable de espacio de aire es de aproximadamente ¾ plg (19 mm). La lámina de aluminio ha resultado el material más exitoso, ya que mantiene una emisividad baja aun en condiciones de oxidación.

Un encamísamiento metálico corrugado, de alta reflexividad, utilizado en aislamientos, sirve para el doble propósito de proteger el aislamiento y de agregar sus propias cualidades aislantes al propiciar un espacio de aire y una superficie altamente reflectora.

SELECCION DEL AISLAMIENTO

De manera sorprendente, existen muy pocos procedimientos estandarizados de prueba para comparar materiales aislantes. Unicamente un método (ASTM C177-45)[1] ha sido aceptado por la American Society for Testing Materials para determinar la conductividad

térmica de los aislamientos. Para obtener resultados reproducibles este método requiere pericia en su aplicación. Las conductividades obtenidas son para aislamientos secados en condiciones específicas de laboratorio. No se conoce la relación entre dichos valores y las conductividades reales de servicio. Se necesitan técnicas mejoradas para la evaluación en laboratorio de propiedades aislantes que puedan ser directamente correlacionadas con el comportamiento real del aislamiento en servicio.

Debido a la falta de correlación entre las mediciones de laboratorio y las características del comportamiento en servicio, es necesario que la selección del aislamiento esté en gran parte basada en la experiencia previa. Dicho procedimiento tiene varias limitaciones, la más importante de las cuales es que favorece la desatención de materiales aislantes de desarrollo reciente. No obstante, las compañías progresivas pueden instituir programas para probar en sus plantas todos los materiales aislantes prometedores. Para evaluar apropiadamente un material aislante, se deben investigar los siguientes factores. El efecto de la humedad y de los cambios de temperatura sobre las propiedades que se anotan, debe ser muy cuidadosamente considerado.

1. Propiedades físicas
   a. conductividad térmica.
   b. calor específico.
   c. coeficiente de expansión.
   d. resistencias a la compresión, a la tensión y al impacto.
   e. dureza.
   f. resistencia a la fatiga.
   g. resistencia al fuego.
2. Propiedades químicas
   a. análisis.
   b. naturaleza corrosiva.
   c. efecto de sustancias químicas en las tuberías o los recipientes sujetos a prueba.
3. Características de instalación
   a. toxicidad.
   b. acción sobre la piel (si produce rasguños, etc.)
   c. manejabilidad total (facilidad para cortarse, para tomar diversas formas, etc.)

SOLICITUD DE PRESUPUESTO Y COTIZACIONES DE AISLAMIENTO

La instalación del aislamiento por lo general se subcontrata con una firma especializada en este tipo de trabajo. El subcontratista debe ser seleccionado al principio del desarrollo del proyecto para

TABLA 19-1. CARACTERISTICAS DE MATERIALES PARA AISLAMIENTOS TERMICOS*

Materiales	Formas generales	Resistencia	Resistencia al agua	Resistencia al vapor	Composición
Rígidos y semirrígidos;					
Fibra de asbesto (estándar)	Procesada en aislamientos de tuberías y en bloques	Buena a la flexión y excelente a la tensión	Excelente	Regular	Fibras largas de amosita, mezcladas con adhesivos
Fibra de asbesto (super)	Procesada en aislamientos de tuberías y en bloques	Buena a la compresión y a la flexión; limitada a la tensión	Regular	Moderada	Fibras largas de amosita, mezcladas con adhesivos y con tierra de diatomáceas
Tierra de diatomáceas	Aislamiento de tuberías, en moldes y formas; segmentos y bloques	Buena a la compresión y a la flexión; limitada a la tensión	Regular	Moderada	Tierra de diatomáceas mezclada con fibras largas de asbesto
Fibras de vidrio	Formadas en aislamientos de tuberías y en bloques	Fibras suaves, flexibles; no se rompen a la flexión	Excelente	Moderada	Fibras de vidrio adheridas
Vidrio celular	Rígido; aislamiento fabricado para tuberías; forros, segmentos y cubiertas de conexiones	Alta a la compresión; regular a la tensión	Excelente	Excelente	Vidrio inorgánico que contiene celdas microscópicas, herméticas, selladas
Silicato de calcio hidratado	Aislamiento de tuberías, en moldes y formas; segmentos y bloques	Buena a la compresión y a la tensión; limitada a la tensión	Buena	Moderada	Silicato hidratado de calcio, mezclado con fibras largas de asbesto
85% de magnesia	Aislamiento de tuberías, en moldes y formas; segmentos y bloques	Buena a la compresión; limitada a la flexión y a la tensión	Regular	Moderada	85% de carbonato hidratado de magnesio
Corcho mineral para baja temperatura	Aislamientos de tuberías, en formas; bloques	Moderadas a la compresión y a la tensión	Buena	Moderada	Fibras de lana mineral con adhesivo de asfalto
Lana mineral para baja temperatura	Mantas semirrígidas, etc. formadas en aislamiento de tuberías, en bloques y forros	Moderadas a la compresión y a la tensión	Regular	Moderada	Fibras de lana mineral, adheridas
Lana mineral para alta temperatura	Moldeada en bloques y en forros	Limitada a la compresión y a la tensión; regular a la flexión	Excelente	Moderada	Fibras minerales mezcladas con adhesivos

* Adaptado con autorización, R. Thomas and W. C. Turner, *Chem. Eng.* 60, No. 6, 221 (1953), complementado por W. C. Turner, Carbide & Carbon Chemical Co.

TABLA 19-1. *(Continuación)*

Ventajas	Desventajas	Limites de temperatura, °F mín	máx	Conductividad Btu/(hr)(pie²)(°F/plg) 32	70	212	500	Densidad lb/pie³
Excelente para puenteo y para tuberías de vapor	Dimensiones no estándares	33	750		0.320	0.390	0.538	14
Alta resistencia al esfuerzo cortante; alta resistencia a la compresión	No apropiado para puenteo bajo cargas pesadas; no flexible	212	1200			0.42	0.56	18
Utilizado como capa interior abajo de 85% de magnesia, se maneja bien donde la temperatura de operación excede de 575°F (300°C)	No apropiado para puenteo bajo cargas pesadas; no flexible	212	1900		0.56	0.59	0.62	25
Ligero de peso, resistente y flexible	Suave, no resiste el abuso mecánico	32	450			0.25 a 0.30		2 a 10
Fácil de tomar forma y ser colocado; no depende de barrera al vapor para su resistencia al vapor; incombustible. Altos limites de temperaturas	Debe ser protegido contra la abrasión. Diseños para expansión y para contracción	−300	800	0.35	0.42	0.53		9
Alta resistencia al esfuerzo cortante; alta resistencia a la compresión	No apropiado para puenteo bajo cargas pesadas; no flexible	70	1200		0.400	0.450	0.540	10 a 11
Alta resistencia al esfuerzo cortante; alta resistencia a la compresión	No apropiado para puenteo bajo cargas pesadas; no flexible	212	550		0.33	0.37		11
Fácil de colocarse a temperaturas atmosféricas; flexible	Requiere cuidadoso tratamiento con vapor; depende de barrera al vapor para su servicio en bajas temperaturas	Abajo de −150	150	0.305	0.325			15
Fácil de colocarse a temperaturas atmosféricas	Requiere cuidadoso tratamiento con vapor; depende de barrera al vapor para su servicio en bajas temperaturas	Abajo de −150	250	0.300	0.320			14
Flexible y soporta considerable expansión y contracción	No resiste el excesivo abuso mecánico sin sufrir un marcado	70	1700		0.33	0.40	0.51	18 a 24

TABLA 19-1. *(Continuación)*

Materiales	Formas generales	Resistencia	Resistencia al agua	Resistencia al vapor	Composición
Poliestireno (expandido)	Bloques y aislamiento de tuberías	Moderada a la compresión; regular a la tensión	Excelente	Excelente	Poliestireno con celdillas de aire
Corcho vegetal	Aislamientos de tuberías en moldes; bloques, forros y cubiertas de conexiones	Compresible bajo carga ligera, pero soporta cargas pesadas	Buena	Regular	Corcho vegetal granulado, mezclado con resina de corcho natural
Mantas Asbestos	Mantas	Regular a la compresión	Regular	Pobre	Fibra de asbesto encerrada en tela de asbesto
Fibras de vidrio	Manta afieltrada de fibras de vidrio, con varios tipos de revestimientos al frente	Suave, flexible; poca resistencia a la compresión después de la aplicación	Buena	Moderada	Fibras de vidrio afieltradas, tejidas con malla metálica u otros revestimientos frontales
Lana mineral	Mantas con varios tipos de revestimientos al frente	Regular a la compresión	Regular	Pobre	Lana mineral afieltrada
Fieltros Fieltro de pelo	Afieltrado en rollos de manta	Densidad estándar, muy esponjoso; densidad alta, muy firme	Poca resistencia	Poca resistencia	100% de pelo de ganado lanar
Fibras de vidrio	Afieltrada en rollos	Suave, flexible; poca resistencia a la compresión después de aplicado	Buena	Moderada	Fibras finas de vidrio, ligeramente adheridas
Lana mineral	Fieltro semirrígido	Regular a la compresión	Buena	Pobre	Lana mineral afieltrada y adherida
Diversos Celdas de aire	Fieltros corrugados, laminados a forma de aislamiento de tuberías y a hojas	Poca a la compresión; moderada a la tensión	Moderada	Moderada	Fieltros de asbesto cementados entre sí
Hojas de asbesto	Fieltros laminados a forma de aislamiento de tuberías, bloques y segmentos curvados	Poca a la compresión hasta comprimirse aproximadamente 20%; moderada resistencia longitudinal	Moderada	Moderada	Hojas de asbesto separadas por nódulos celulares esponjosos o por marcado de la superficie
Hojas de fieltro de lana	Hojas laminadas a forma de aislamiento de tuberías	Buena a la compresión y a la tensión	Moderada	Moderada	Hojas adheridas de fieltros de trapo
Cemento	Mezcla de lana mineral y agua; semitermofraguado	Al impacto normalmente buena	El agua ablanda el cemento seco	Moderada	Lana mineral nodulada y fibras de asbesto con adhesivos inorgánicos
Cemento	Mezcla de lana mineral y agua; fraguado hidráulico	Al impacto muy buena	No se ablanda al mojarse	Moderada	Lana mineral nodulada y fibras de asbesto con adhesivos inorgánicos

TABLA 19-1. *(Continuación)*

Ventajas	Desventajas	Límites de temperatura, °F mín	máx	Conductividad Btu/(hr)(pie²)(°F/plg) 32	70	212	500	Densidad lb/pie³
Fácil de colocarse, flexible, limpio y ligero de peso	Para un servicio efectivo depende en parte de barrera al vapor	−200	200	0.23 a 0.40@ 40°F				2
Alta resistencia a la vibración, regular resistencia a la tensión; puede prefabricarse	En áreas críticas debe ser tratado a prueba de fuego; depende de barrera al vapor, en baja temperatura de servicio	−200	300	0.25	0.26			6 a 10
Removible sin maltratarse	Cada instalación debe ser diseñada bajo pedido	100	950			0.50	0.65	10
Fibras ligeras, flexibles, que no se romperán por impacto moderado; las fibras responden a la compresión repetida	Suave; poca resistencia a la compresión	40	1000		0.26			3
Soporta expansión y compresión	Suave	50	1200			0.35	0.45	12
Excelente aislamiento de emergencia para baja temperatura; puede amoldarse a cualquier forma y tamaño de tuberías y recipientes	Requiere cuidadoso tratamiento de vapor; depende de barrera al vapor para su servicio en bajas temperaturas; se quema	Abajo de −150	200	0.25	0.260			10 (Estándar) 15 a 17 (Pesado)
Flexible; las fibras responden a compresión repetida; buen acolchonamiento térmico	Depresión pronunciada bajo cargas pesadas	No se conoce	600					1
Resistentes; pueden soportar expansión y contracción	No puede permitir abuso mecánico	No se conoce	600		0.18 a 0.25	0.30 a 0.40	0.60 a 0.80	4 a 8
Peso ligero; costo bajo	No soporta abusos severos	100	300		0.490	0.550		9
Resistencia regular a la tensión	Se afloja y reblandece cuando se moja	100	700		0.390	0.450	0.560	23
Costo bajo	No se debe usar en áreas críticas; se quema	32	225	0.510				18
Características buenas de aplicación con cuchara; acabado liso; adhesión y cohesión buenas	Fraguado lento; no soporta el impacto de la lluvia	100	1800		0.690	0.820	1.058	26
Características regulares de aplicación con cuchara; acabado liso; adhesión y cohesión buenas; fraguado rápido	No puede ser retrabajado	32	1700	0.46	0.525	0.610	0.840	49

que sus planes puedan llevarse a efecto en conjunto con el contratista principal.

Cuando se hacen las solicitudes de presupuesto al contratista en aislamientos, el diseño detallado real de la planta de proceso todavía no ha sido desarrollado. Generalmente sólo se han hecho el diagrama de ingeniería de flujo, un plano de distribución general de la planta y, quizá, varios estudios preliminares de elevación. Es necesario, por consiguiente, suministrar al contratista en aislamientos una muy completa descripción de los requisitos de los aislamientos que él va a cotizar. Debido a la cantidad limitada de planos disponibles al momento de hacer la solicitud de presupuesto, es esencial una estrecha cooperación entre el contratista en aislamientos y el contratista principal.

Una solicitud de presupuesto sobre aislamientos debe incluir una descripción del trabajo con referencia a los planos apropiados. También deben proporcionarse las especificaciones completas de aislamiento. Estas deben incluir no únicamente el aislamiento por usar, sino también los métodos de aislamiento preferidos. Con objeto de que todas las cotizaciones puedan ser adecuadamente juzgadas, debe darse una clara descripción de las cifras de costo deseadas.

Con la solicitud de presupuesto debe incluirse una lista completa de todas las líneas por aislar. Esta lista debe mostrar las temperaturas de operación a fin de poder seleccionar, con base en las especificaciones, el espesor apropiado de aislamiento. Deben indicarse con toda claridad las partes de recipientes que no han de ser aisladas, tales como las orillas y las tapas de las bocas de acceso.

Además de las cifras a precio alzado, deben solicitarse precios unitarios* para todos los tamaños de tubería, conexiones, válvulas y recipientes que se conozcan con anticipación. Una estrecha cooperación con el vendedor, reducirá sustancialmente la cantidad de trabajo implicada en tal procedimiento. Los precios unitarios para recipientes, deben ser dados en costo de aislamiento por pie cuadrado de área del casco y de área de la cabeza del recipiente. Si cada vendedor cotiza sobre la misma base, los presupuestos a precio alzado pueden utilizarse con toda propiedad para determinar la oferta más baja.

INSTALACION DEL AISLAMIENTO

Independientemente de la extensa variedad de tipos de aislamientos, la mayoría de ellos se fabrican en una o más de tres formas, a saber: bloques, mantas, o cubiertas moldeadas seccionales para tu-

* Debido al incompleto desarrollo del diseño de la planta al tiempo en que se hace la solicitud de presupuesto, es necesario permitir al contratista en aislamientos aplicar honorarios adicionales si ambas partes convienen en que el alcance del proyecto ha cambiado durante el desarrollo del diseño. Los precios unitarios sirven para aplicarse en la evaluación de los costos adicionales introducidos.

berías. Los métodos de instalación de estas tres formas de aislamiento son similares, al margen de la clase de aislamiento que se esté empleando. En toda instalación de aislamiento se aplican dos reglas generales. Una, es que las superficies deben limpiarse perfectamente antes de comenzar la instalación. La otra, es que si el aislamiento se instala en varias capas, todas las juntas deben quedar "cuatrapeadas" (Fig. 19-3). Esta colocación de las juntas reduce al mínimo la posibilidad de fugas caloríficas a través de ellas.

Aislamiento de bloque y de manta

El aislamiento que se surte en forma de bloques se usa extensamente en recipientes, cambiadores de calor, y otros equipos similares (Fig. 19-1). Para asegurar la instalación sobre torres y cambiadores de calor, se usan flejes galvanizados de ½ × 0.020 plg (13 × 0.5 mm). En las cabezas, superior e inferior, del recipiente el aislamiento se sostiene con flejes que se aseguran por medio de pernos o tuercas soldados. Para ayudar a soportar los bloques, se sueldan ángulos de acero alrededor de los recipientes verticales y espaciados a 8 o 12 pies entre centros. Estos soportes son de ½ plg menos de espesor con respecto al del aislamiento. Terminando el bloque en ambos extremos del ángulo y llenando el espacio con lana mineral suelta, se adapta una junta de expansión (Fig. 19-2).

La junta de expansión se cubre con una tela de hierro galvanizado o metal desplegado Núm. 20 y con una malla metálica, y luego recibe un acabado, por medio de un cemento aislante, que la hace

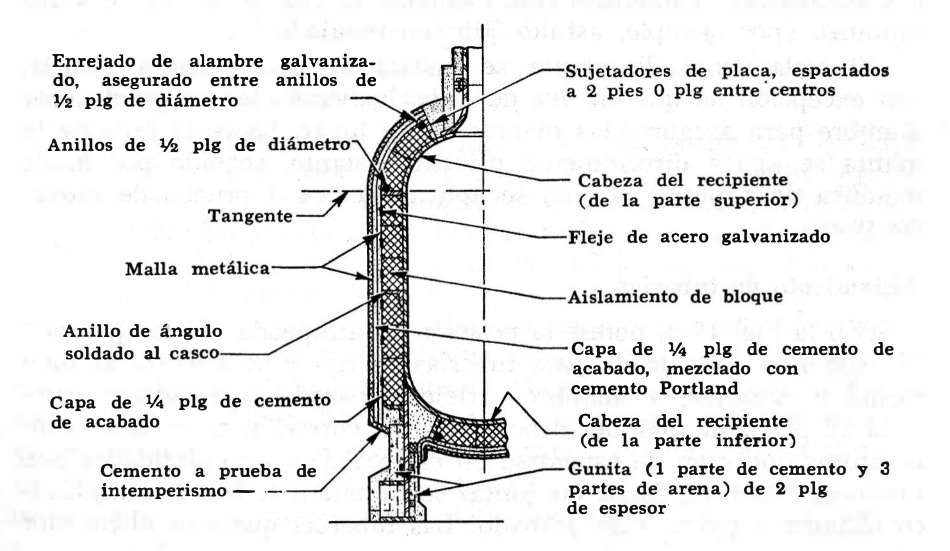


FIG. 19-1. Aislamiento típico de recipiente.

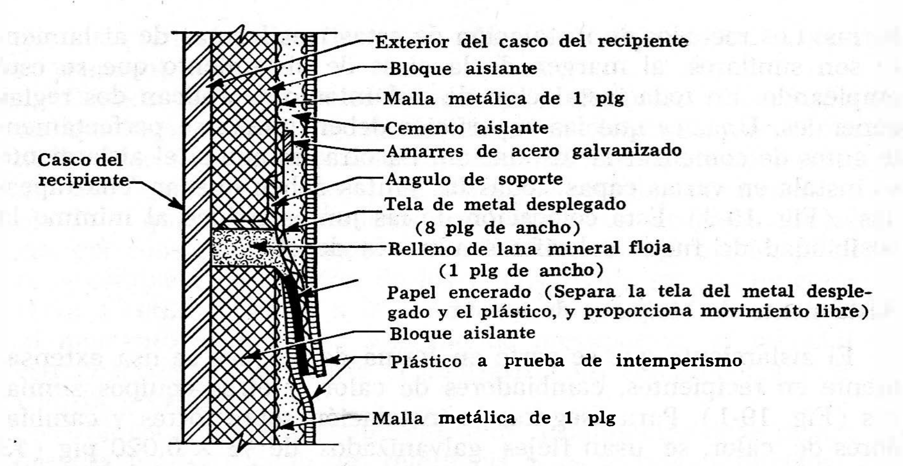


FIG. 19-2. Junta típica de expansión para aislamiento de bloques.

hermética al intemperismo. Después que los bloques han sido colocados, con ayuda de alambre, en su lugar, alrededor de todo el recipiente se estira y aprieta una malla metálica (de 1 plg) formando un enrejado. Sobre esta malla de alambre se aplican varias capas de plástico aislante (cemento de acabado), el cual es una combinación de gránulos de lana mineral, fibras de asbesto, arcillas y materiales inhibidores de la corrosión. Para instalaciones exteriores se forma otro enrejado con malla de 1 plg, seguido por un recubrimiento final de plástico resistente al intemperismo, a base de una emulsión asfáltica especial. Todas las grietas del aislamiento se hacen herméticas al intemperismo mediante el uso de un cemento instantáneo (por ejemplo, asfalto "fibrado rebajado"*).

El aislamiento de manta se instala de una manera similar, con excepción de que en vez de flejes galvanizados se puede usar alambre para asegurar las mantas en su lugar. Sobre el área de la manta se aplica directamente plástico aislante, seguido por malla metálica de 1 plg, a la cual se aplica plástico a prueba de intemperismo.

Aislamiento de tuberías

(En la Fig. 19-3, nótese la posición "cuatrapeada" de las juntas.) El aislamiento moldeado para tuberías se fija y se asegura al tubo mediante amarres de alambre o flejes separados aproximadamente cada 12 plg. Este alambre debe resistir la corrosión o las altas temperaturas que sean de esperarse en el área. Las irregularidades que producen claros en donde las juntas se empatan, se llenan con plástico aislante o plástico de acabado. Las tuberías que van al interior

* *Fibrated cut-back asphalt,* en el original. (N. del T.)

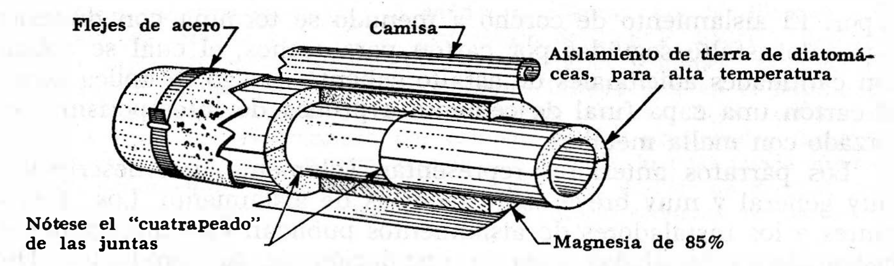


FIG. 19-3. Aislamiento seccional en varias capas, de una tubería.

llevan un acabado a base de una camisa de lona de 6 oz, la cual se pega sobre la cubierta del tubo. Los aislamientos que van al exterior se cubren con una camisa a prueba de intemperismo, tal como de cartón para techos o forro de acero galvanizado o de aluminio.

Las válvulas y las conexiones se aíslan con segmentos de bloques u otro aislamiento del mismo material utilizado en los tramos rectos de tubo. Estos segmentos se fijan en su lugar por medio de alambre y se terminan con un recubrimiento de plástico aislante. Las conexiones más pequeñas de 3 plg, por lo general se aíslan con plástico seguido por un recubrimiento de asbesto cemento de acabado duro.

Por lo que se refiere a las bridas, se ha encontrado que es más económico omitir el aislamiento de ellas en todas las líneas, menos en las de vapor. En plantas de proceso se hace necesario con tanta frecuencia extraer secciones de líneas para inspección o reparación, que resulta menos costoso omitir sencillamente el aislamiento alrededor de las bridas, y así evitar la destrucción de toda la sección de aislamiento cuando se extrae el tubo.

Aislamiento de baja temperatura

La principal diferencia en la instalación de aislamiento de baja temperatura es que debe idearse algún medio de prevenir que el vapor de agua penetre al aislamiento. Puesto que la superficie interior del aislamiento está a una temperatura más baja que la superficie exterior, la presión de vapor de agua en la superficie interna es menor que en la externa y el flujo de vapor de agua es hacia el interior, en donde se congela y causa un notorio aumento en la conductividad del aislamiento y origina también su deterioro. Para reducir al mínimo este movimiento de vapor de agua puede instalarse una barrera al vapor. Los materiales que sirven como barreras al vapor incluyen el fieltro a prueba de vapor, el cual está terminado con un compuesto sellante de asfalto fibrado, seguido por una camisa a prueba de intemperismo. Otra barrera al vapor, que funciona con éxito, consiste en una hoja de aluminio laminada entre capas de papel Kraft terminadas con un adhesivo especial a prueba de

vapor. El aislamiento de corcho a menudo se ternüna con diversas capas de asfalto seguidas por cartón para techos, el cual se aplica con cantidades adicionales de asfalto caliente. Luego se aplica sobre el cartón una capa final de cemento a prueba de intemperismo reforzado con malla metálica.

Los párrafos anteriores representan solamente una descripción muy general y muy breve sobre técnicas de aislamiento. Los fabricantes y los instaladores de aislamientos publican especificaciones e instrucciones detalladas para la instalación de sus productos. Dichas instrucciones son muy fáciles de obtener y, por supuesto, deben ser seguidas.

REFRACTARIOS

La temperatura máxima que cualquiera de los materiales aislantes anteriormente discutidos puede soportar es 1900°F (1040°C). Por encima de esta temperatura es necesario emplear materiales refractarios, por lo general vaciados en forma de ladrillos, para conservar el calor en hornos, reactores y otros equipos similares. La selección del refractario más económico depende de diversos factores diferentes del precio. Estos incluyen las propiedades físicas y químicas que se enumeran más adelante. Afortunadamente, muchas de las pruebas necesarias para evaluar dichas propiedades han sido estandarizadas por la American Society for Testing Materials.

1. Propiedades físicas

a. Peso específico.

b. Porosidad; indicación de la resistencia a la penetración por escorias y gases.

c. Resistencia fría; indica la capacidad de soportar condiciones adversas de embarque.

d. Temperatura de ablandamiento; determinada por el uso del método equivalente del cono pirométrico, el cual consiste en comparar la muestra de prueba en forma de pequeño cono, con conos estándares de puntos de ablandamiento conocidos.

e. Prueba de carga; mide las fallas que pueden ocurrir durante la aplicación sostenida de una carga de 25 lb/plg² (1.75 kg/cm²), bajo las condiciones de la temperatura de operación. Los ladrillos, tales como los de sílice, fallan súbitamente a una temperatura específica, en tanto que los ladrillos de barro refractario muestran una falla gradual.

f. Cambios dimensionales a altas temperaturas; ASTM[5] proporciona un método para determinar los cambios en dimensiones que se presentan en periodos prolongados de calentamiento a las temperaturas de operación. Esta información es útil en el diseño de hornos.

g. Expansión térmica; importante en la planeación final del diseño del horno.

h. Descostramiento; definido como el rompimiento de fragmentos de la superficie del refractario, es una propiedad importante que debe ser considerada en el diseño apropiado de paredes refractarias. Se presentan tres tipos de descostramiento. El descostramiento térmico, que es causado por

cambios térmicos producidos al enfriar o calentar. Los ladrillos de magnesita, de cromita y de sílice (por debajo de 1200°F, 650°C), tienen la más baja resistencia térmica de los refractarios comunes. El descostramiento mecánico, que se debe a esfuerzos introducidos en el ladrillo por medios mecánicos, tales como una expansión excesiva. El descostramiento estructural, que es originado por cambios en las propiedades físicas de una cara del ladrillo en comparación con la otra, lo cual puede producir descostramiento debido a expansiones desiguales. ASTM[5] ha descrito pruebas para determinar las características de descostramiento de los refractarios.

i. Conductividad térmica; ésta es una propiedad importante porque determina el espesor requerido de ladrillo para un muro refractario dado.

j. Permeabilidad; la permeabilidad del ladrillo a líquidos y gases es importante, ya que una combinación de ataques internos y externos por alguna escoria o por algún gas durante el uso del refractario, producirá una falla en extremo rápida.

2. Propiedades químicas

a. Composición química; como una verificación de calidad de refractarios, es recomendable conocer la composición química de cada lote utilizado.

b. Reacciones químicas con refractarios; es importante estar familiarizado con la química de las reacciones que puedan ocurrir entre los refractarios y los materiales presentes en los hornos. El término escoria es un vocablo más bien genérico, que sirve para designar las impurezas fundidas presentes en un horno o reactor. Las reacciones de estas impurezas con el ladrillo refractario deben ser bien conocidas, y debe escogerse un refractario que soporte dicho ataque. Además, la resistencia de los refractarios a la atmósfera gaseosa en la cual van a estar expuestos, es igualmente importante. Se sabe que el monóxido de carbono, los halógenos y varios gases ácidos afectan adversamente a ciertos refractarios. Es imperativo que los fabricantes sean consultados sobre estos problemas, y es todavía más importante el prever que ciertos materiales refractarios, si se colocan unos junto a otros al levantar los muros refractarios, pueden reaccionar entre sí bajo las condiciones existentes de operación.

Los refractarios pueden ser divididos en cuatro grupos principales: refractarios de alúmina-sílice, de sílice, básicos y aislantes. En la Tabla 19-2 se reproduce una comparación de algunos de los más importantes de estos refractarios. Los llamados refractarios básicos incluyen la magnesita, la cromita y la forsterita. Además, se citan ciertos refractarios especiales, tales como el carburo de silicio y la zirconia, los cuales resultan económicos bajo ciertas condiciones severas.

En la Fig. 19-4 se comparan las conductividades térmicas de varios refractarios. Es interesante notar la marcada diferencia entre las conductividades térmicas de los ladrillos aislantes y de otros refractarios. El ladrillo aislante se fabrica con arcillas (Tabla 19-3), las cuales se mezclan con un material combustible tal como el serrín o el corcho pulverizado. Por la acción del fuego, los materiales combustibles se queman, dejando una estructura porosa. Los ladrillos aislantes son extremadamente ligeros de peso y tienen una baja

TABLA 19-2. CARACTERISTICAS DE LADRILLOS REFRACTARIOS*

Nombre	Composición, porcentaje	Punto de fusión, °F	Límite normal de uso, °F**	Costo aproximado dls/millón Btu, equivalencia en 9 plg	Peso específico verdadero	Densidad de bulto lb/pie^3	Origen
Alúmina-Sílice							
Base barro refractario							
Primera calidad	35–40 Al_2O_3 54–60 SiO_2	3090–3175	2400–2700	95	2.60–2.70	125–140	Barro refractario
Semisílice	70–80 SiO_2	2940–3060	2400–2700	100	2.40–2.45	125–140	Barro refractario
Superrefractario	41–45 Al_2O_3 51–55 SiO_2	3175–3200	2500–2800	115	2.65–2.75	130–145	Barro refractario de pedernal
Superrefractario de alto quemado	41–45 Al_2O_3 51–55 SiO_2	3175–3200	2500–2800	155	2.65–2.75	130–145	Barro refractario de pedernal
50% de alúmina	50 Al_2O_3	3200–3245	2500–2800	160	2.75–2.85	130–145	Barro refractario, diásporo, bauxita
60% de alúmina	60 Al_2O_3	3245–3310	2700–2900	200	2.90–3.05	130–145	Barro refractario, diásporo, bauxita
70% de alúmina	70 Al_2O_3	3290–3335	2700–2900	235	3.15–3.25	135–150	Diásporo, bauxita
80% de alúmina	80 Al_2O_3	3335–3390	2800–3000	260	3.35–3.45	140–155	Diásporo, bauxita
90% de alúmina	90 Al_2O_3	3390–3425	2800–3200	1175	3.55–3.65	172	Alúmina calcinada
Base cianita	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 58–68 Al_2O_3	3250–3300	2800–3000	500–680	3.00–3.06	140–150	Cianita
Base caolín (De alto quemado)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 44–45 Al_2O_3	3190	2800–2900	170–335	2.65–2.75	135–145	Caolín
Base mullita fundida	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 72–75 Al_2O_3	3325–3350	2900–3200	685–1370	3.08–3.25	150–160	Bauxita y sintética
Sílice							
Estándar	SiO_2	3142 (pura)	3000	95–100	2.30–2.38	100–105	Arena cuarzosa, "ganister"
Superrefractaria	SiO_2	3142 (pura)	3000 y más	110	2.30–2.38	100–105	Arena cuarzosa, "ganister"

TABLA 19-2. (*Continuación*)

Magnesita							
Quemada	MgO más SiO_2, Fe_2O_3 Cr_2O_3	5070 (pura)	3000–4000	520	3.40–3.60	160–165	Magnesita, agua de mar, salmueras, brucita
Químicamente adherida	MgO más FeO, Cr_2O_3		2900–3100	465	3.60–3.80	170–175	Magnesita, agua de mar, salmueras, brucita
Cromita							
Quemada	$FeO \cdot Cr_2O_3$ puro, más algo de Al_2O_3, MgO, Fe_2O_3 SiO_2	3540–3990	2800–3200	430	3.60–4.10	185–190	Minerales de cromita
Químicamente adherida	$FeO \cdot Cr_2O_3$ más MgO	3540–3990	2900–3100	450–485	3.90–4.10	170–180	Minerales de cromita
Forsterita	$2MgO \cdot SiO_2$	3461 (pura)	3000	530	3.30–3.40	150–155	Olivina o sintéticas
Carburo de silicio	SiC	Se disocia a 4082	2800–3200	1520	3.19	155	Sintética
Alúmina fundida	Al_2O_3	3722 (pura)	3400	2000	3.70–3.90	175–195	Arenas de zircón
Zircón	$ZrO \cdot SiO_2$	4532 (pura)	3400	1210	4.70	205	Arenas de zircón
Zirconia (estabilizada)	ZrO_2	4870 (pura)	4300	9430	5.75	275	Bauxita
Carbono (Grafito)	C	6330	4000 (atmósfera reducida)	1600	2.25	137	Carbono

† *Ganister*, en el original. Arenisca dura, fina y compacta de la que se obtiene una arcilla refractaria para forro de hornos. (N. del T.)

* Reimpreso con autorización, Norton, C. L., Jr. *Chem. Eng.* 60, Núm 6, 216, 1953.

** Nótese que las temperaturas del "Límite normal de uso" son sólo aproximadas porque las condiciones de servicio a veces producen cambios de varios cientos de grados en las temperaturas permisibles. Dichas condiciones pueden incluir atmósferas fuertemente reductoras y cargas poco usuales.

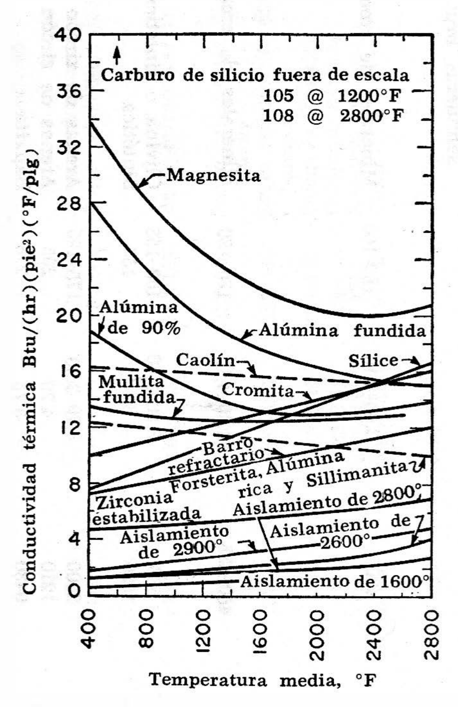


FIG. 19-4. Conductividades térmicas de ladrillos refractarios y aislantes. [Adaptada con autorización, C. L. Norton, Jr., *Chem. Eng.* 60, Núm. 6, 216 (1953).]

conductividad térmica. Descubrimientos recientes han hecho posible producir ladrillos aislantes que soportan temperaturas hasta de 3000°F (1650°C). Por consiguiente, bajo ciertas condiciones es posible economizar empleando ladrillos aislantes en lugar de los ladrillos refractarios más pesados (ladrillos recocidos a fuego) anteriormente utilizados. Su baja conductividad hace posible usar un muro mucho más delgado y su peso ligero permite un calentamiento y enfriamiento mucho más rápidos del horno. El uso del ladrillo aislante, sin embargo, está limitado a situaciones en donde su baja resistencia mecánica no es una desventaja y su alta permeabilidad puede ser tolerada.

Los refractarios básicos son más resistentes a las escorias básicas. Los ladrillos de barro refractario, de alúmina rica, y de sílice se usan más ventajosamente en contacto con escoria silicosa. La temperatura de operación juega una parte importante en la selección final de un refractario para resistir una atmósfera o condición de escoria dadas.

El ladrillo refractario se ha estandarizado en varias formas y tamaños. En la Fig. 19-5 se ilustran diversas formas típicas.

TABLA 19-3. CARACTERISTICAS DE LADRILLOS AISLANTES TIPICOS*

Tipo†	Composición, porcentaje	Límite normal de uso °F‡	Costo aproximado dls/ Millón de Btu equiv. en 9 plg	Densidad de bulto lb/pie³
Grupo 16	15–37 Al_2O_3 30–60 SiO_2 más TiO_2 Fe_2O_3, Alcalino	1600	115	21–37
Grupo 20	26–38 Al_2O_3 45–61 SiO_2 más TiO_2, Fe_2O_3, Alcalino	2000	125	26–45
Grupo 23	25–42 Al_2O_3 45–67 SiO_2 más TiO_2, Fe_2O_3, Alcalino	2300	150	27–47
Grupo 26	40–46 Al_2O_3 47–55 SiO_2 más TiO_2, Fe_2O_3, Alcalino	2600	195	43–64
Grupo 28	45–53 Al_2O_3 42–52 SiO_2 más TiO_2, Fe_2O_3, Alcalino	2800	260	45–65
Otros	45 Al_2O_3 65 Al_2O_3 90 Al_2O_3	2900 3000 3250	285 480 750	52 69 81

* Reimpresa con autorización, Norton, C. L., Jr., *Chem. Eng.*, 60, Núm. 6, 216, 1953.

† El número de grupo es la clasificación estándar A.S.T.M.; dicho número indica (× 100) su limite de uso normal.

‡ Véase la nota de la Tabla 19-2.

Instalación del enladrillado

La colocación del ladrillo refractario requiere los servicios de albañiles expertos, familiarizados con este material. Una planeación cuidadosa de la obra previene pedir de un 5 a un 10% en exceso de los requerimientos estimados, debido a los desperdicios inevitables que ocurren durante la obra.

En la Fig. 19-6 se ilustran los métodos comunes de colocar los ladrillos. La selección del método depende de las dimensiones y estabilidad requeridas en la estructura final. Un muro típico de horno normalmente requiere una combinación, la más común de las cuales es a base de hiladas longitudinales y transversales, alternadas. Este arreglo produce una mayor estabilidad estructural puesto que en tal forma todas las juntas verticales quedan compensadas.

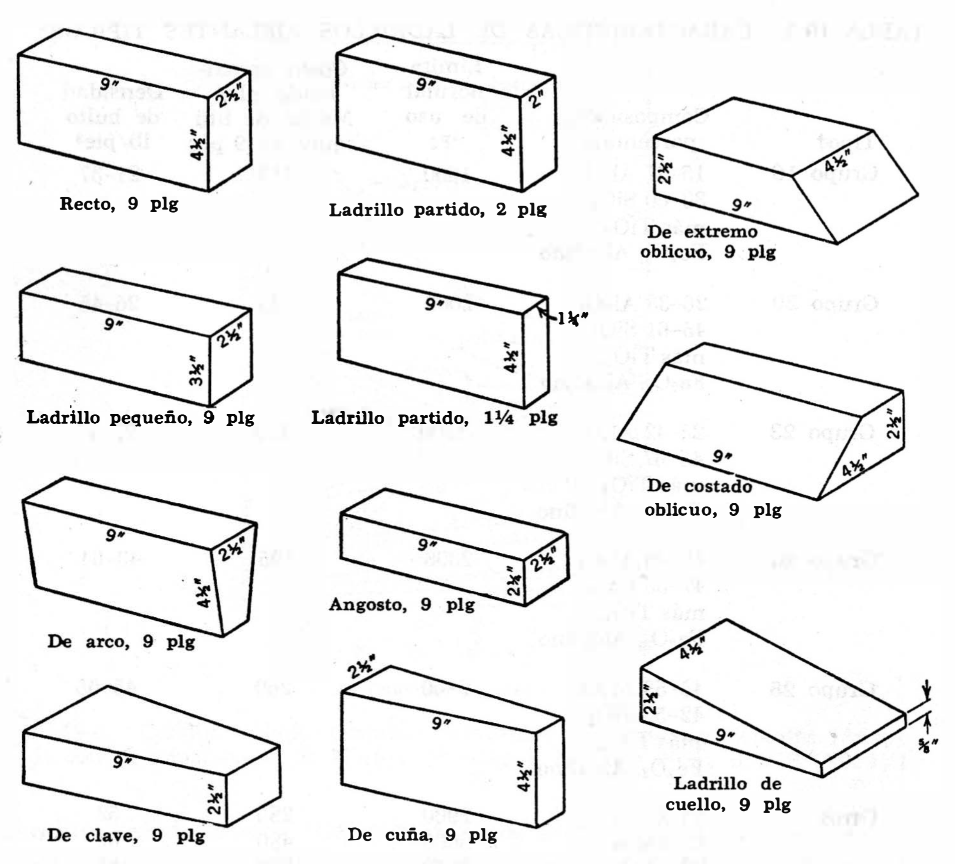
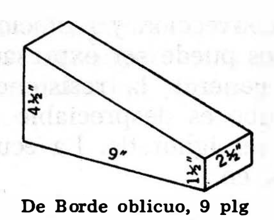


FIG. 19-5. Formas típicas de ladrillos refractarios. (Cortesía de Harbison-Walker Refractories Company.)

La fase más compleja del enladrillado de refractarios es la construcción de aberturas u orificios en los muros y arcos suspendidos (techo de un cerramiento). Las anchuras de las puertas se mantienen lo más pequeñas posibles. Los arcos suspendidos consisten en unidades refractarias especiales, diseñadas para recibir soportes metálicos, los cuales, a su vez, se fijan a una armadura superior de acero.

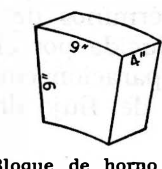
PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE SUPERFICIES AISLADAS

El cálculo de pérdidas de calor a través de superficies aisladas, implica la suma de las diversas resistencias al flujo de calor. En una situación dada, las temperaturas de los extremos se conocen. Por ejemplo, la temperatura del fluido en el interior de un tubo ais-

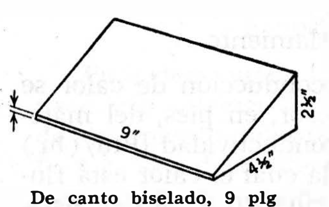


De Borde oblicuo, 9 plg

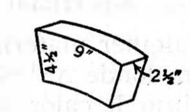
Para cúpula y bloque de horno rotatorio 6 plg



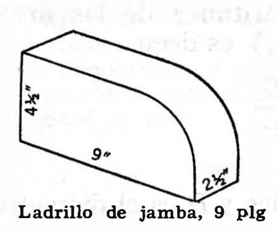
Bloque de horno rotatorio, 9 plg



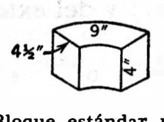
De canto biselado, 9 plg



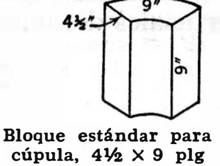
Ladrillo circular estándar 9 × 4½ × 2½ plg



Ladrillo de jamba, 9 plg



Bloque estándar para cúpula, 4½ × 4 plg



Bloque estándar para cúpula, 4½ × 9 plg

lado y la temperatura ambiente se conocen, y el flujo de calor puede ser expresado de una manera análoga al flujo de electricidad.

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \tag{1}$$

en donde q = flujo de calor en Btu/hr
ΔT = caída total de temperaturas desde el fluido interior hasta el aire exterior
R_T = suma de todas las resistencias

El calor fluye por convección a través del fluido del interior del tubo y por conducción a través de la pared del tubo y del aislamiento.

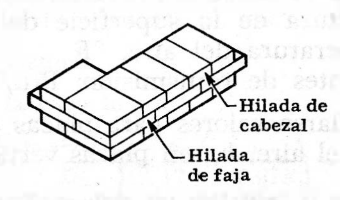


FIG. 19-6. Métodos comunes de colocar los ladrillos.

El calor pasa luego, por una combinación de convección y radiación, al aire circundante. Cada uno de estos procesos puede ser expresado en términos de resistencias apropiadas. En general, la resistencia producida por el fluido y por la pared del tubo es despreciable en comparación con la del aislamiento y puede ser ignorada. La ecuación del flujo de calor se convierte, entonces, en:

$$q = \frac{\Delta T}{R_i + R_s} \tag{2}$$

en donde R_i = resistencia del aislamiento
R_s = resistencia "superficial" del aislamiento

La resistencia de cualquier material a la conducción de calor se expresa como $\Delta X/kA$, en donde ΔX es el espesor, en pies, del material en la dirección del flujo de calor, k es la conductividad [Btu/(hr)(pie)(°F)] y A es el área (pies^2) a través de la cual el calor está fluyendo. Para un aislamiento que rodea a un cilindro, como el aislamiento de una tubería, el área superficial varía del interior al exterior y debe determinarse alguna área media. Se ha demostrado que esta área media corresponde a la media logarítmica de las áreas superficiales del interior (A_1) y del exterior (A_2), es decir:

$$\frac{A_2 - A_1}{\ln \dfrac{A_2}{A_1}} \quad \text{o} \quad \pi L \frac{D_2 - D_1}{\ln \dfrac{D_2}{D_1}}$$

en donde L es la longitud del aislamiento en pies y D es el diámetro, también en pies.

Para esferas, se puede demostrar que esta área media es equivalente a la media geométrica ($\sqrt{A_1A_2}$) de las áreas interior y exterior.

La resistencia superficial es, por lo general, mucho menor que la del aislamiento y únicamente necesita ser estimada. Está representada como $1/(h_c + h_r)A_2$, en donde h_c es el coeficiente de convección y h_r el coeficiente de radiación. A partir de la siguiente ecuación empírica,* pueden estimarse los valores del coeficiente combinado, $h_c + h_r$, para tubos aislados horizontales,

$$h_c + h_r = \frac{564}{(d_2^{0.19})(273 - \Delta t_i)} \tag{3}$$

en donde d_2 = diámetro exterior del aislamiento, plg
Δt_i = temperatura de la superficie del aislamiento menos la temperatura del aire, °F
$h_c + h_r$ = coeficientes de transmisión, Btu/(hr)(pie^2)(°F)

También pueden calcularse valores para placas planas. El coeficiente de convección para el aire, h_c, en placas verticales puede determi-

* Esta ecuación se basa en la presentada por Heilman, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, **44**, 308 (1922).

narse a partir de la ecuación $h_c = 0.27\Delta t^{0.25}$, en donde Δt es la diferencia de temperaturas entre el aire y el exterior de la placa. El coeficiente de radiación puede ser determinado por la ecuación:

$$h_r = \frac{0.173e_1\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4\right]}{T_1 - T_a} \tag{4}$$

en donde e_1 = emisividad de la placa a T_1
T_1 = temperatura absoluta de la placa en °R
T_a = temperatura absoluta del aire en °R

Para determinar las conductividades y los valores de h_c y h_r, es necesario suponer las temperaturas superficiales de las varias capas de aislamiento, puesto que tanto la conductividad como los valores de h_c y h_r son dependientes de la temperatura. Estas suposiciones pueden ser verificadas después de calcular el flujo de calor, puesto que dicho flujo debe ser el mismo a través de cada resistencia. El siguiente ejemplo servirá para ilustrar los principios anteriores.

EJEMPLO. Un tubo de 2 plg (2.375 plg de diámetro exterior) que lleva un aceite a 650°F se aísla con una capa interior de 1½ plg de aislamiento para alta temperatura y una capa exterior de 1½ plg de magnesia de 85%. La temperatura ambiente es 70°F. Calcular las pérdidas de calor por pie de longitud de tubo.

Conductividades Térmicas, Btu/(hr)(pie)(°F)

Temperatura	Aislamiento de magnesia de 85%	Aislamiento de alta temperatura (Tierra de diatomáceas-asbesto)
100	0.034	
200	0.038	0.054
300	0.040	0.056
400	0.043	0.058
500	0.046	0.060
600		0.061
650		0.0615

SOLUCIÓN. Supóngase que:

1. **Temperatura de la pared exterior del tubo = 650°F.**
2. **Temperatura promedio de la capa interior de aislamiento = 500°F.**
3. **Temperatura promedio de la capa exterior de aislamiento = 250°F.**
4. **Temperatura superficial exterior = 150°F.**

Base: 1 pie de longitud.

Area promedio de la capa interior

$$\frac{\pi}{12}\left(\frac{D_2 - D_1}{\ln\frac{D_2}{D_1}}\right) = \frac{\pi}{12}\left(\frac{3}{\ln\frac{5.375}{2.375}}\right) = 0.96 \text{ pies}^2$$

Area promedio de la capa exterior

$$\frac{\pi}{12}\left[\frac{3}{\ln\frac{8.375}{5.375}}\right] = 1.77 \text{ pies}^2$$

Area exterior $\frac{\pi}{12} 8.375 = 2.2 \text{ pies}^2$

R_i: $R_i = \frac{1.5}{(12)(0.06)(0.96)} + \frac{1.5}{(12)(0.039)(1.77)} = 2.17 + 1.81 = 3.98$

R_s: $\Delta t_i = 150 - 70 = 80$

De la Ec. 3,

$$h_c + h_r = \frac{564}{(8.375)^{0.19}(273 - 80)} = 1.96 \text{ Btu/(hr)(pies}^2\text{)(° F)}$$

$$R_s = \frac{1}{(h_c + h_r)(A)} = \frac{1}{(1.96)(2.2)} = 0.23$$

Por lo cual $q = \frac{650 - 70}{3.98 + 0.23} = \frac{580}{4.21} = 138 \text{ Btu/hr}$

Verificación de las suposiciones:

Capa interior

$$\Delta T = (q)(R)$$

$$\Delta T = (138)(2.17) = 300$$

o, Temperatura promedio $= \frac{650 + (650 - 300)}{2} = 600°\text{F}$; supuesta 500°F

Capa exterior

$$\Delta T = (138)(1.81) = 250° \text{ F}$$

Temperatura superficial = 350 − 250 = 100°F; supuesta 150°F

Temperatura promedio $= \frac{350 + 100}{2} = 225°\text{F}$; supuesta 250°F

El cambio relativamente pequeño de conductividad con la temperatura indica que no se justifican más cálculos. El valor de 138 Btu/hr es satisfactorio.

ESPESOR OPTIMO DE AISLAMIENTO

Teóricamente, la determinación del espesor óptimo de aislamiento es un procedimiento directo. A medida que el espesor de aislamiento aumenta, los costos de las pérdidas de calor disminuyen, en tanto que los costos de aislamiento se incrementan. El punto en el cual se alcanza un costo mínimo total, puede ser descrito como un valor óptimo.

McMillan[7] ha desarrollado una solución analítica para este punto óptimo particular, igualando a cero la ecuación de la primera derivada del costo total.

Para superficies planas

$$X = \sqrt{\frac{ak'}{b}} - R_s k \tag{5}$$

en donde X = espesor óptimo de aislamiento, en plg
$a = y(t - t_a)M/1\,000\,000$
y = horas de operación al año
M = valor del calor en dólares por millón de Btu
b = costo del aislamiento por pie², por plg de espesor, por año
R_s = resistencia superficial, (hr) (°F) (pie²)/Btu
k' = conductividad, Btu/(hr) (pie²/plg) (°F)
t = temperatura del lado caliente del aislamiento, °F
t_a = temperatura del aire, °F

Para superficies cilíndricas (un material aislante)

$$\left(r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} + R_s k'\right)\sqrt{\frac{2r_2 - r_1}{r_2 - R_s k'}} = \sqrt{\frac{ak'}{b}} \tag{6}$$

en donde r_2 = radio exterior de aislamiento, plg
r_1 = radio interior de aislamiento, plg

En la Fig. 19-7 se presenta una gráfica de estas expresiones para diversos valores de $\sqrt{ak'/b}$. Los fabricantes de aislamiento y compañías de operación tienen especificaciones de aislamiento, las cuales incluyen espesores recomendados para varias condiciones de servicio. La mayoría de estas recomendaciones se basaron en las ecuaciones de McMillan y fueron determinadas en los últimos años de la década de 1920. Desde entonces, los costos ciertamente han cambiado, por lo cual se indica una revaluación. Un punto adicional acerca de las ecuaciones de McMillan es que las expresiones utilizadas para el desarrollo de los costos de aislamiento, no se aplican necesariamente a todos los aislamientos.

[Superficies planas: costo por pie² $= bx + C$

Superficies cilíndricas:

$$\text{costo por pie lineal} = \frac{2\pi r_2 b}{12}(r_2 - r_1) + C$$

en donde C es una constante]

Independientemente de estas objeciones, las tablas (que fácilmente se pueden adquirir de los fabricantes de aislamientos) relati-

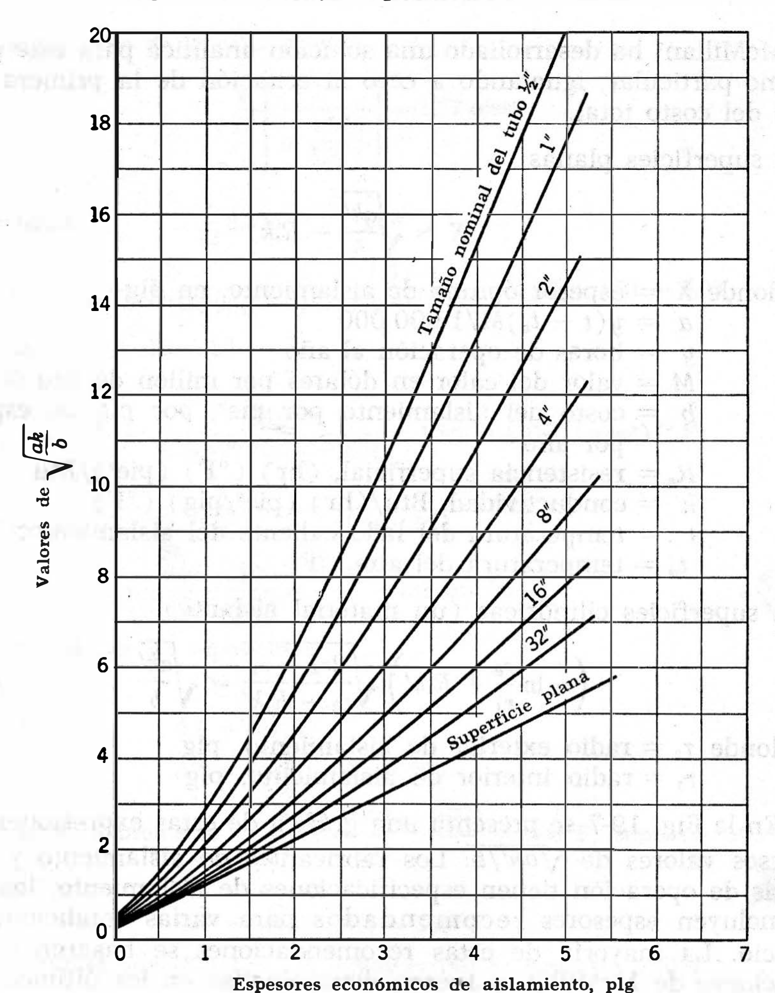


FIG. 19-7. Espesor económico de aislamiento. (Reimpreso con autorización, L. B. McMillan, *Paper No. 2034*, Annual Meeting of ASME, New York, Dec. 1926; y propietario de los derechos literarios, Johns Manville Corporation.)

vas a espesores recomendados, representan una aproximación bastante cercana a un espesor "correcto". En cualquier caso, estos espesores se han popularizado a través del uso, y los cambios drásticos deben estar bien justificados antes que sean aprobados por la gerencia. En realidad, es difícil que tal evidencia se produzca.

El efecto del viento, de la lluvia y, en especial, de los cambios súbitos de clima pueden ser muy adversos sobre la operación de las unidades fraccionadoras. Por ejemplo, un cambio súbito de clima, típico de los que se presentan en los Estados Unidos, en la Costa del Golfo, con frecuencia ha causado violentos trastornos en los equipos fraccionadores, debidos a pérdidas crecientes de calor a través del

aislamiento. En tales casos, si todos los factores pudieran ser evaluados se podrían justificar aislamientos todavía más gruesos, aunque el llamado espesor óptimo fuera algo menor.

El efecto de la velocidad del viento en las pérdidas de calor a través del aislamiento es relativamente pequeño, del orden de 10 a 15%, si el aislamiento está bien sellado. La mayor parte de la resistencia es aportada por el aislamiento y no por la resistencia superficial, que es todo lo que es afectado por el viento. No obstante, la pérdida puede llegar a ser grande en caso de que el aislamiento se agrietara. Para evitar pérdidas de calor a través de estas grietas, deben idearse mejores métodos de instalación de aislamientos. Aunque la situación es algo confusa, los usuarios de aislamientos no deben menospreciar el proceso de razonar objetivamente cuando se presentan situaciones nuevas. Los modernos materiales aislantes, las localizaciones poco acostumbradas (tales como los climas extremosamente fríos), y otras características exclusivas deben ser examinadas y evaluadas en la mejor forma posible, sobre la base de principios sólidos de ingeniería.

EFICIENCIA DE AISLAMIENTO

Eficiencia de aislamiento es un término que frecuentemente aparece en la literatura y catálogos de los fabricantes. Se define como la diferencia entre la pérdida de calor a través del tubo desnudo y la que se tiene en el mismo tubo aislado, dividida entre la pérdida de calor a través del tubo sin aislar. Los fabricantes reportan tablas de estas eficiencias para varios tamaños y espesores de aislamientos.

Sin embargo, los valores son engañosos para el usuario casual, ya que son altos, y lo que parece ser una diferencia pequeña en eficiencia, de únicamente 2% (96 y 94), puede representar un aumento en pérdidas de calor, de $(96 - 94/100 - 96)(100) = 50\%$. Las tablas de pérdidas de calor son mucho más útiles para comparar diversos espesores y clases de aislamientos.

REFERENCIAS

1. *ASTM Standards*, Part III, 298, Am. Soc. Testing Materials, New York, 1950.
2. Geller, R. F., *Fire-Clay Brick, Their Manufacture, Properties, Uses, and Specifications*, Bureau of Standards Circular Núm. 282, Washington, D. C., 1926.
3. Jakob, Max, y G. A. Hawkins, *Elements of Heat Transfer and Insulation*, 2a. Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1950.
4. Kern, D. Q., *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
5. *Manual of ASTM Standards on Refractory Materials*, Am. Soc. Testing Materials, New York, 1948.
6. McAdams, W. H., *Heat Transmission*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1953.

7. McMillan, L. B., *Heat Transfer through Insulation in the Moderate and High Temperature Fields*, Amer. Soc. Mech. Engrs' annual meeting, 6 a 9 de Dic., 1926.
8. *Modern Refractory Practice*, Harbison-Walker Refractories Company, Pittsburgh, 1950.
9. Norton, C. L., Jr., *Chem. Eng. 60*, Núm. 6, 216 (1953).
10. Norton, F. H., *Refractories*, 3a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.
11. Thomas, R. y W. C. Turner, *Chem. Eng. 60*, Núm. 6, 221 (1953).
12. Wilkes, G. B., *Heat Insulation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.

CAPITULO 20

INSTRUMENTOS DE PROCESO

Las industrias de proceso no podrían existir sin instrumentos que indicasen, registrasen, controlasen y, en algunos casos, se anticipasen a los muchos cambios que ocurren en un proceso. Aun en procesos que requieren control manual, los instrumentos le avisan al operador cuándo se debe dar vuelta a una válvula u oprimir un botón.

Los avances en tecnología de instrumentos han sido sorprendentes. En los últimos años de la década de 1930, los instrumentos y dispositivos de control eran relativamente sencillos y se usaban unos cuantos tipos estándares. Cualquier ingeniero podía comprenderlos y aplicarlos para casi todas las condiciones. Durante la Segunda Guerra Mundial, y a partir de entonces, los cambios han sido más rápidos y continúan a un ritmo acelerado. Los mayores avances se refieren al uso de equipo electrónico. Las complejidades de tales sistemas y los rápidos cambios producidos por la recientemente estimulada industria instrumental, han requerido la creación de otro grupo de especialistas. Algunos físicos, ingenieros químicos, ingenieros mecánicos e ingenieros electricistas se han convertido en ingenieros de proceso a través de procedimientos autoeducativos y del entrenamiento proporcionado por las compañías productoras de instrumentos. Estas personas han sido empleadas no sólo por dichas compañías sino también por compañías constructoras y de operación. Muchas escuelas de ingeniería química ofrecen cursos de instrumentación de procesos, que contribuyen a entrenar más ingenieros químicos para este tipo de trabajo y a otros los ponen al tanto de los problemas y de las técnicas de la ingeniería de instrumentación.

Toda selección, aplicación y compra de instrumentos debe ser dirigida por un ingeniero de esta especialidad. Para un ingeniero de proceso o de proyecto es imposible estar al día con los últimos desarrollos de instrumentos, a menos que toda su atención esté dedicada a este campo.

Para proporcionar una instrumentación apropiada, el ingeniero de esta especialidad debe estar completamente familiarizado con todas las fases del proceso, sus características fundamentales, y la aplicación o función de todo el equipo de proceso. Inversamente, un conocimiento general sobre instrumentación es de utilidad, durante el desarrollo inicial del proceso, tanto al ingeniero de proceso como al de proyecto.

El objetivo de la discusión que se presenta más adelante es suministrar conceptos generales sobre instrumentación. Se dispone de obras completas sobre este tema,[1,5,6,8,9,10] las cuales deben ser utilizadas para problemas específicos que requieran conocimientos más detallados. No obstante, debido a los rápidos cambios que están teniendo lugar, también deben consultarse las diversas publicaciones periódicas conocidas sobre esta materia.

PRINCIPIOS GENERALES

Para indicar o controlar una variable de proceso, un instrumento debe ser capaz de detectar los cambios en dicha variable. La parte sensible del instrumento puede ser llamada elemento primario. Por medios eléctricos, neumáticos o mecánicos, el instrumento traduce este impulso primario en una indicación o registro visibles. También puede actuar sobre otros dispositivos para cambiar condiciones de proceso, a manera de que la variable detectada pueda ser regresada a cierto punto predeterminado. Por consiguiente, un instrumento está constituido por algún tipo de dispositivo sensible primario en contacto con el fluido o sustancia; una unidad amplificadora; y, finalmente, una unidad física que indica o registra y traduce el impulso sensible primario en alguna clase de energía o movimiento.

La automatización o instrumentación no se limita, por supuesto, a estas características básicas, sino que se ha desarrollado para detectar e indicar casi todas las características físicas y químicas conocidas. Estas incluyen la presión, temperatura, densidad, fluidez, viscosidad, color, pH o composición. Sin embargo, generalmente no es necesario controlar con precisión y de manera simultánea cada variable del proceso. De ordinario, únicamente ciertas variables clave necesitan ser controladas para obtener las características deseadas de producto final.

TIPOS DE INSTRUMENTOS

Clasificación

La siguiente lista de fases de instrumentación o de control es necesaria con miras a la discusión del tema.

Fases sensibles primarias

(1) Flujo, (2) temperatura, (3) presión, (4) nivel de líquidos, (5) movimiento.

Elementos primarios; tipos

1. Flujo, (1.01) mecánico, (1.02) diferencial, (1.03) de área.
2. Temperatura, (2.01) de expansión sólida, (2.02) de expansión fluida, (2.03) termoeléctrico.
3. Presión, (3.01) tipo bourdon, (3.02) de fuelle, y (3.03) eléctrico y electrónico de diafragma.
4. Nivel de líquidos, (4.01) diferencial, (4.02) de flotador, (4.03) de diversos tipos, (4.04) visual o manual.
5. Movimiento, (5.01) tacométrico, (5.02) de límite, (5.03) de conteo.
6. Mediciones químicas y físicas.

Sistemas de control

(*a*) Manuales, (*b*) mecánicos, (*c*) neumáticos, (*d*) hidráulicos, (*e*) eléctricos y electrónicos.

Medición de flujo

Medición mecánica del flujo

La forma más elemental de mediciones volumétricas consiste en llenar y vaciar una cámara de volumen conocido. Este tipo de medición se usa en las industrias de proceso para hacer inventario de fluidos en tanques o recipientes de almacenamiento. Ciertos procesos requieren, a intervalos regulares, la medición manual o instrumental de tanques como una verificación de otras determinaciones de flujo.

El medidor común de desplazamiento mide líquidos llenando y vaciando alternativamente las cámaras que contiene en su interior (Fig. 20-1). Las caídas de velocidad y presión a través del dispositivo, se utilizan para mover las cámaras o diafragmas y las válvulas conectadas. Cada ciclo es contado por una serie de engranes numerados, los cuales están visibles. Estos medidores son relativamente baratos y dan un servicio prolongado y preciso cuando se usan den-

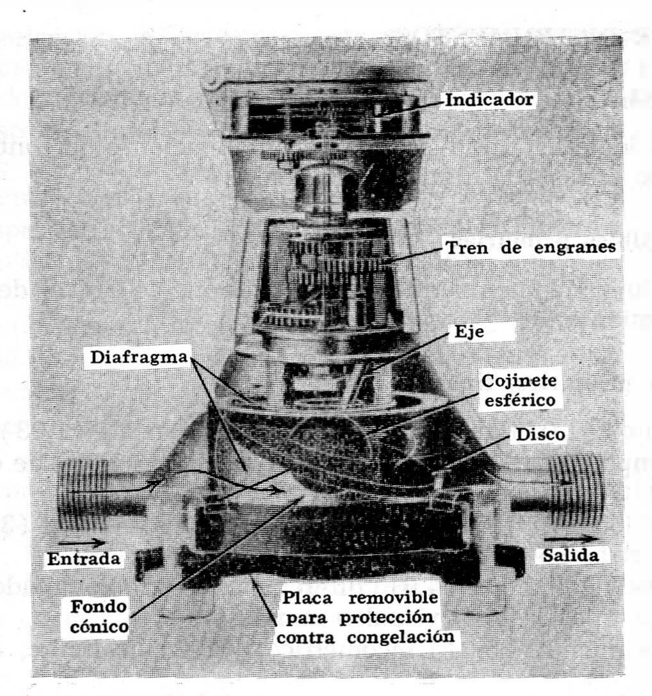


FIG. 20-1. Medidor de desplazamiento, de disco oscilante. [Reimpreso con autorización: G. G. Brown. *Unit Operations*, John Wiley and Sons (1950).]

tro de sus rangos de capacidad, como lo demuestran los medidores domésticos de agua y de gas. El indeseable efecto de pulsaciones, que se tiene en el tipo más sencillo de medidor por desplazamiento, queda eliminado en aquellos diseños que utilizan un movimiento oscilante y rotatorio. Teniendo en cuenta que es, básicamente, un dispositivo totalizador, el medidor de desplazamiento se usa con más frecuencia para la medición de una producción total que para registrar cantidades instantáneas de flujo. La mayoría de los medidores de desplazamiento no pueden operar a altas presiones y temperaturas.

Los medidores de desplazamiento se emplean extensamente en operaciones de llenado y mezclado, cuando se requieren mediciones volumétricas precisas. En el mezclado de productos costosos, tales como aceites lubricantes, se usan medidores de desplazamiento mecánicamente conectados. En el llenado de barriles o en operaciones de llenado de recipientes se utilizan medidores con interrupción automática.

Instrumentos de presión diferencial

Los medidores de flujo de presión diferencial convierten una parte de la energía de presión de un fluido en energía cinética. Esto se logra colocando en un tubo una constricción, tal como un orificio,

un venturi, o una tobera de flujo (Fig. 20-2). Si la fricción se desprecia, la caída de presión a través de dicha restricción se relaciona con el cambio de energía cinética en la siguiente forma:

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g_c}\right)\rho \tag{1}$$

en donde P_1 = presión a la entrada de la restricción, lb/pie²
P_2 = presión en la restricción o en algún punto predeterminado después de ella, lb/pie²
u_1 = velocidad, pies/seg, antes de la restricción
u_2 = velocidad, pies/seg, en la restricción o después de ella
g_c = 32.17
ρ = densidad del fluido que circula, lb/pie³

Expresando u_1 en términos de u_2, se puede obtener una ecuación para velocidad en el punto 2.

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}\sqrt{\frac{2g_c\,\Delta P}{\rho}} \tag{2}$$

La Ec. 2 puede ser expresada en términos de lb de fluido circulando por segundo, como sigue:

$$W' = \frac{\pi D_2^2}{4\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}\sqrt{2g_c\rho\,\Delta P} \tag{3}$$

en donde D_1 = diámetro del tubo en pies
D_2 = diámetro de la restricción en pies
ΔP = diferencial de presión en lb/pie²

Estas ecuaciones, sin embargo, están basadas en un flujo ideal sin fricción. En la práctica, los efectos friccionales consumen una parte de la energía de presión. La manera más conveniente de compensar la pérdida de energía por fricción ha sido una constante determinada empíricamente, llamada coeficiente de descarga, y que es la relación del flujo real al flujo teórico. Por tanto, el flujo real es:

$$W = \frac{\pi D_2^2 C}{4\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}\sqrt{2g_c\rho\,\Delta P} \tag{4}$$

en donde C = coeficiente de descarga

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} = \text{velocidad de factor de llegada}$$

Manuales apropiados, tales como la publicación clásica ASME, *Medidores de Fluidos,*[8] presentan correlaciones de C para los diversos tipos de orificios, medidores venturi y toberas de flujo contra el número de Reynolds a través de la restricción. La relación $C/\sqrt{1 - (D_2/D_1)^4}$ con frecuencia se denomina coeficiente de flujo, K. Se han publicado[8] tablas de números de Reynolds y los correspondientes valores de K para diferentes tamaños de tuberías y relaciones D_2/D_1. Por medio de dichas compilaciones se simplifica la solución por tanteos para el cálculo de flujos o de diámetros requeridos de orificios para un flujo y presión diferencial dados. Se supone un número de Reynolds y en la tabla se lee K para una relación dada D_2/D_1. Los valores de K no varían grandemente en el rango de la mayoría de las aplicaciones industriales, por lo cual la solución es rápida.

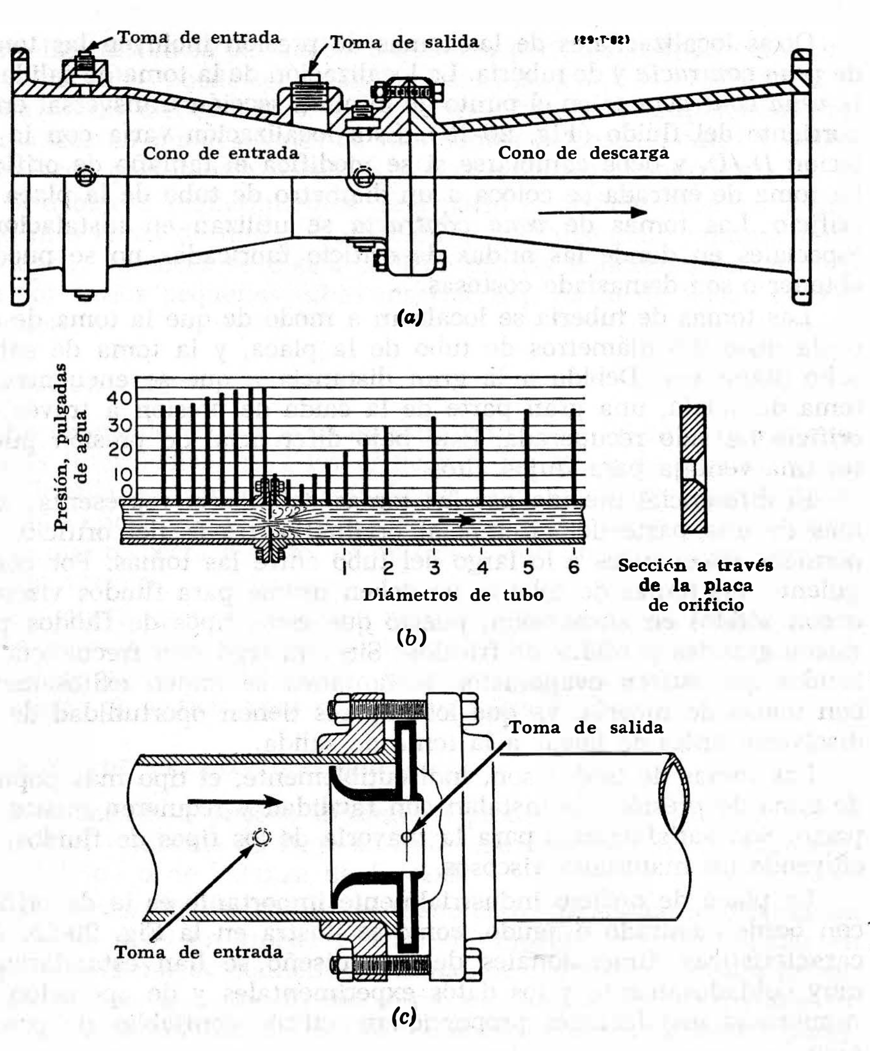
Afortunadamente, la estandarización en la construcción de orificios, venturis y toberas de flujo se logró hace ya varios años. Bastantes datos experimentales y de operación se han acumulado, de lo que han resultado correlaciones generalizadas de C con el número de Reynolds. Estos datos hacen posible diseñar y operar medidores diferenciales sin necesidad alguna de calibración, siempre y cuando se hayan seguido los estándares descritos[8] de construcción e instalación.

Medidor venturi

El medidor venturi (Fig. 20-2*a*) tiene un ángulo de llegada de 21° o menos, lo cual elimina las cavidades. El ángulo de salida es de 7° a 9° a modo de que la expansión al regresar al tamaño original del tubo sea uniforme, y alta la recuperación de presión. La pequeña pérdida de energía debida a la fricción, que se demuestra por las bajas pérdidas permanentes de fricción ($C = 0.92$ a 0.99), es la característica exclusiva de un medidor venturi. Por consiguiente, este tipo de medidor se usa en sistemas en los cuales —como sucede en los sistemas de baja presión de gas o de distribución de agua— las altas pérdidas de presión no pueden ser toleradas. Las pérdidas de presión en sistemas de agua que implican flujos grandes, aumentan considerablemente los costos de bombeo. En tales casos el medidor venturi, aunque más caro que el de orificio o el de tobera de flujo, resultará más económico basado en costos globales de instalación y operación.

Medidor de orificio

La placa de orificio es la restricción más sencilla, barata y popular para medición de flujo. Los medidores de orificio comprenden más del 90% de la mayoría de las instalaciones medidoras de las plantas de proceso. Los valores del coeficiente de descarga varían de 0.59 a 0.62 (véanse los datos publicados para tabulaciones).[8]



. 20-2. Elementos primarios de presión diferencial. (*a*) Medidor Venturi rtesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company); (*b*) instalación de lidor de orificio en la que se muestra la variación de presión (adaptado *Fundamentals of Instrumentation for the Process Industries,* con autori-ión de Minneapolis-Honeywell Regulator Company); (c) tobera de flujo rtesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company).

Las bridas de orificio con tomas en la brida (Fig. 18-3) se pue- obtener de numerosos fabricantes. La placa de orificio se inserta re estas bridas y las tomas de presión son machueleadas en el rpo de la brida por el fabricante. Las tomas se localizan de ma-a que cuando las bridas y la placa estén armadas, exista 1 plg re cada toma y la placa.

Otras localizaciones de las tomas de presión incluyen las tomas de *vena contracta* y de tubería. La localización de la toma de salida de la *vena contracta* es en el punto de mínima sección transversal en la corriente del fluido (Fig. 20-2*b*). Esta localización varía con la relación D_2/D_1 y debe cambiarse si se modifica el tamaño de orificio. La toma de entrada se coloca a un diámetro de tubo de la placa de orificio. Las tomas de *vena contracta* se utilizan en instalaciones especiales en donde las bridas de orificio fabricadas no se pueden obtener o son demasiado costosas.

Las tomas de tubería se localizan a modo de que la toma de entrada diste 2.5 diámetros de tubo de la placa, y la toma de salida ocho diámetros. Debido a la gran distancia a que se encuentra la toma de salida, una gran parte de la caída de presión a través del orificio ha sido recuperada. Este bajo diferencial de presión puede ser una ventaja para flujos altos.

El diferencial medido por las tomas de tubería representa, además de una parte del diferencial original a través del orificio, las pérdidas friccionales a lo largo del tubo entre las tomas. Por consiguiente, las tomas de tubería no deben usarse para fluidos viscosos o con sólidos en suspensión, puesto que estos tipos de fluidos producen grandes pérdidas de fricción. Sin embargo, con frecuencia los fluidos que sufren evaporación instantánea se miden exitosamente con tomas de tubería, ya que los vapores tienen oportunidad de redisolverse antes de llegar a la toma de salida.

Las tomas de bridas son, indiscutiblemente, el tipo más popular de toma de presión. Se instalan con facilidad y requieren menos espacio. Son satisfactorias para la mayoría de los tipos de fluidos, incluyendo los materiales viscosos.

La placa de orificio industrialmente importante es la de orificio con borde cuadrado o agudo, como se ilustra en la Fig. 20-2*b*. Las características dimensionales de este diseño se han estandarizado muy cuidadosamente y los datos experimentales y de operación en numerosas instalaciones proporcionan cifras confiables de predicción.

Cualquier cambio radical en el orificio durante su uso, tal como el redondeado de sus bordes por corrosión o erosión, introducirá un serio error. Por esta razón, para resistir el ataque del fluido en circulación, las placas de orificio deben ser construidas con los mejores materiales disponibles.

Las instalaciones de orificios deben diseñarse con cuidado. Una turbulencia excesiva en puntos cercanos al orificio causará lecturas erróneas. Los coeficientes de descarga publicados se basan en un flujo que es aproximadamente paralelo al eje del tubo.

A cada lado del orificio es necesario que haya una longitud definida de tubo recto, sin obstrucciones. Sprenkle,[11] a partir de estudios de varios sistemas de tuberías, ha desarrollado nomogramas que dan

la mínima distancia permisible a que una perturbación, tal como una curva del tubo, puede ser localizada con respecto a la entrada y a la salida de un orificio. Estos nomogramas han sido ampliamente reproducidos en publicaciones de fabricantes de instrumentos y deben usarse con preferencia a ciertas reglas empíricas generales.

Si debido a requerimientos de espacio el orificio debe ser localizado más cerca de una perturbación que la distancia mínima recomendada, entonces se deben utilizar paletas enderezadoras, formadas por varios pequeños tubos insertados a modo de llenar todo el conducto.

Tobera de flujo.

La tobera de flujo que se muestra en la Fig. 20-2*c* tiene características intermedias entre los orificios y los tubos de venturi. Tiene una llegada suavemente redondeada pero una descarga abrupta, y es más eficiente que el orificio pero menos que un medidor venturi. Por lo que respecta a costo, es más cara que un orificio pero menos que un venturi.

Lo tobera, que se coloca en su lugar por medio de bridas estándares, es más indicada para la medición de gases que contienen humedad, como el vapor húmedo. Estas condiciones causan erosión en las placas de orificio pero no afectan a las toberas.

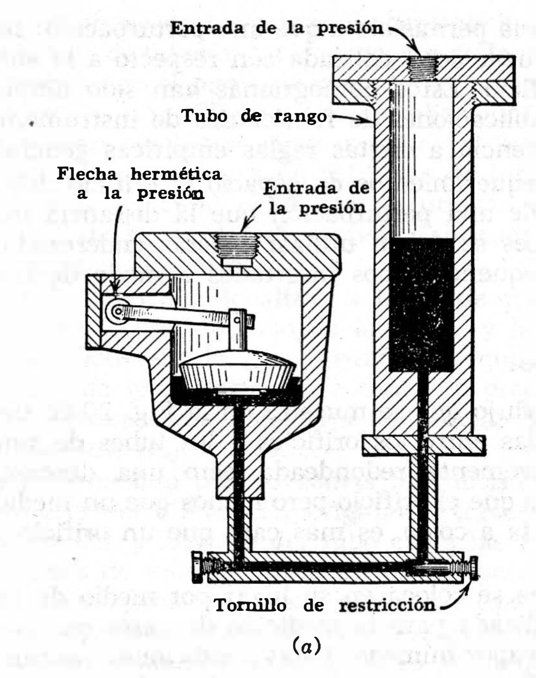
Medición de presión diferencial

Para medir la presión diferencial producida por orificios, tubos de venturi y toberas de flujo se usan manómetros tipo de mercurio (Fig. 20-3*a*) o de balanza de fuerzas.

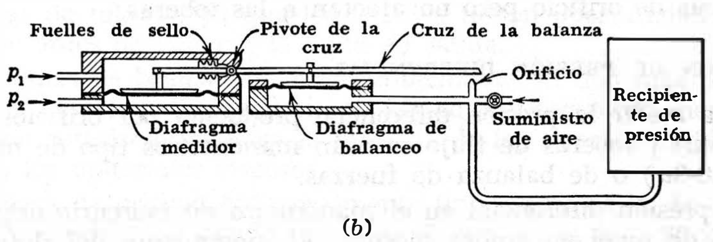
La presión diferencial en el manómetro de mercurio origina un cambio de nivel en ambas piernas. El movimiento del flotador en la pierna de mayor diámetro se transmite por medio de una articulación mecánica a una flecha a través del cuerpo del manómetro para dar una indicación externa. El movimiento de la flecha puede ser utilizado para indicar, registrar o controlar (véase la Fig. 20-3*a*). Ciertos tipos de manómetros eliminan la extensión de flecha a través del instrumento mediante el uso de un solenoide o magneto contenido dentro del mismo cuerpo del manómetro.

La pierna más larga con el diámetro más pequeño se denomina tubo de rango. Aunque el diferencial total está representado por el movimiento en ambas piernas, el movimiento en la pierna que tiene el flotador es función del diferencial total. El rango del instrumento se aumenta disminuyendo el diámetro del tubo de rango. Para un diferencial dado, esto causa más movimiento en este tubo que en el tubo de flotador.

El manómetro de mercurio ha servido durante muchos años como dispositivo del principio de medición de presión diferencial. Ha



(*a*)



(*b*)

FIG. 20-3. Dispositivos diferenciales sensibles a la presión. (*a*) Manómetro de mercurio; (*b*) medidor de balanza de fuerzas. [Reimpreso con autorización de D. P. Eckman, *Industrial Instrumentation*, John Wiley and Sons (1950).]

sido sólo en años recientes que el instrumento tipo de balanza de fuerzas (Fig. 20-3*b*) o de balanza neumática fue introducido y ha ganado popularidad. El manómetro de balanza de fuerzas opera desarrollando una fuerza en oposición a la presión diferencial.

Esta fuerza opuesta se origina por presión de aire. A medida que P_2 aumenta (Fig. 20-3*b*), la cruz de la balanza cubre una mayor área del orificio por el cual el aire se está perdiendo. Este movimiento aumenta la presión de aire en el diafragma de balanceo y hace que éste fuerce la cruz separándola del orificio. Entonces se establece un equilibrio de fuerzas que está representado por la presión de aire alcanzada en el sistema. Esta presión de aire es directamente proporcional a la presión diferencial y puede ser rápidamente trans-

mitida a un instrumento de registro que tiene un fuelle neumático el cual actúa una pluma para registrar o indicar el flujo.

Estos medidores que no operan con mercurio son de tamaño pequeño y sencillos de calibrar e instalar. No requieren recipientes de sello. A diferencia de los dispositivos de manómetro de mercurio, pueden montarse en el orificio soportándolos de la tubería por medio de un simple tirante con abrazadera.

Medidores de área

En lugar de mantener una restricción constante de área y dejar que la presión diferencial varíe con el flujo, en los medidores de área la presión diferencial se mantiene constante y se deja variar el área. El tipo más importante de medidor de área es el rotámetro (Fig. 20-4). Consiste de un tubo de sección cónica alargada y de un flotador. Conforme el flujo aumenta, el flotador asciende creando mayor área para el flujo del fluido y manteniendo así una presión diferencial constante a través del flotador.

Utilizando el mismo proceso de razonamiento que en el desarrollo de la Ec. 3 y expresando la diferencial constante de presión a través del flotador en términos de las condiciones en el equilibrio [$\Delta P = V_f(\rho_f - \rho)/A_f$] se obtiene la siguiente ecuación:

$$W = C_r A_2 \sqrt{\frac{2g_c\rho(\rho_f - \rho)V_f}{A_f}} \qquad (5)$$

en donde W = flujo, lb/seg
C_r = coeficiente de descarga del rotámetro
ρ = densidad del fluido
ρ_f = densidad del flotador
V_f = volumen del flotador
A_f = área efectiva del flotador
A_2 = área anular entre el flotador y el tubo

Puesto que $V_f = W_f/\rho_f$ (en donde W_f = peso del flotador), el grado de cambio de rango producido reduciendo el peso del flotador se expresa por:

$$\frac{W_2}{W_1} = \sqrt{\frac{W_{f_2}}{W_{f_1}}} \qquad (6)$$

La Ec. 6 está basada en la suposición de que C_r no varía y de que el fluido y el área efectiva del flotador permanecen constantes. Los fabricantes de rotámetros ofrecen aumentos de peso que pueden ser fijados a los diseños estándares de flotadores con objeto de aumentar el rango del instrumento.

El área anular A_2 varía con el flujo y es directamente proporcional a la altura del flotador. Al calcular curvas para rotámetros, de

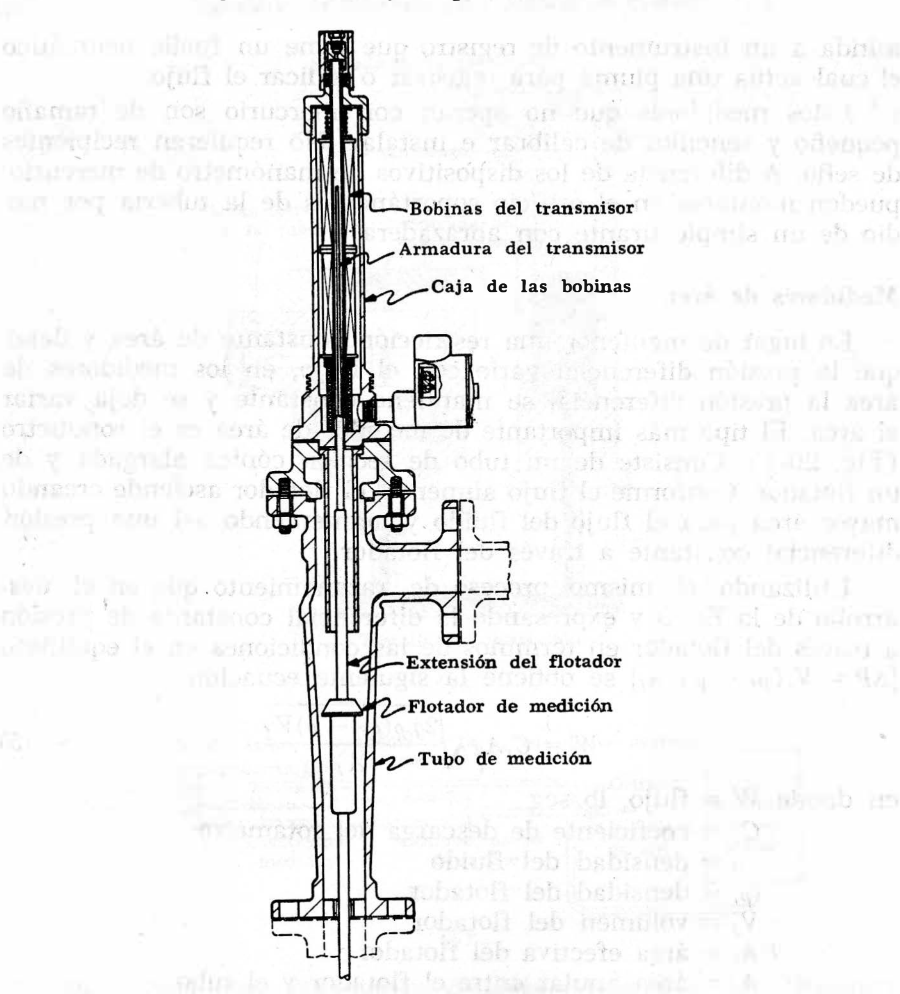


FIG. 20-4. Rotámetro con transmisor eléctrico. (Cortesía de Fisher and Porter Company.)

altura del flotador contra flujo, aun para materiales viscosos, pueden usarse datos de los fabricantes.

Los rotámetros vienen provistos con tubos medidores de vidrio que permiten la observación visual del flotador o con tubos medidores de metal con extensiones indicadoras. Para transmitir la posición del vástago de extensión a un registrador o controlador se pueden obtener diversos dispositivos transmisores, electrónicos y neumáticos.

En el caso de flujos viscosos su calibración se puede predecir con mayor exactitud con rotámetros que con orificios. Estos medidores son satisfactorios y baratos para instalaciones pequeñas, pero muy costosos para flujos extremadamente grandes.

Instrumentos medidores de temperatura

Una amplia variedad de dispositivos medidores de temperatura satisfacen las diversas necesidades de temperatura, rango y servicio. Aquí se considerarán los que se usan en las plantas de proceso.

En la Tabla 20-1 se presenta un resumen de rangos usuales de temperatura para los instrumentos más comunes. Estos rangos están sujetos a cambios tan pronto aparecen nuevos desarrollos. No obstante, en la selección de un dispositivo para temperatura se consideran muchos factores diferentes al rango. Estos incluyen exactitud, velocidad de respuesta, sensibilidad, costo y resistencia a la corrosión. Los fabricantes están al pendiente de aconsejar a los usuarios acerca del uso y las limitaciones de sus equipos, por lo que siempre deben ser consultados sobre el particular.

Termómetros de expansión sólida

Como es bien sabido, todos los materiales cambian de dimensiones con la temperatura. Si dos tiras de metal se sueldan entre sí, una con bajo coeficiente de expansión (Invar, que es aleación de

TABLA 20-1. RANGO INDUSTRIAL COMUN DE INSTRUMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

(Con base en datos de los fabricantes)

Tipo	Rango, °F
1. Bimetálico	—100 a 1 000
2. Mercurio en vidrio	—38 a 750
3. Expansión de fluidos	
(*a*) Mercurio	—38 a 1 000
(*b*) Líquido orgánico	—125 a 500
(*c*) Vapor orgánico-líquido	—40 a 600
(*d*) Gas	—400 a 1 000
4. Termopar	
(*a*) Cobre-constantán**	—300 a 600
(*b*) Hierro-constantán	0 a 1 400 (atmósfera oxidante) o 1 800 (atmósfera reductora)
(*c*) Cromel-alumel*	600 a 2 100
(*d*) Platino-platino-rodio	1 300 a 3 000
5. Resistencia	
(*a*) Cobre	— 40 a 250
(*b*) Níquel	—300 a 600
(*c*) Platino	—300 a 1 800
6. Pirómetro óptico	850 a 5 200
7. Pirómetro de radiación	200 a 7 000

* Marca registrada de la Hoskins Corporation.

** Aleación formada por partes aproximadamente iguales de níquel y de cobre. (N. del T.)

hierro-níquel) y la otra con alto coeficiente de expansión (latón o níquel), la tira resultante se flexionará por influencia de la temperatura. Con tiras delgadas puede obtenerse una flexión grande, la cual puede ser usada para mover una aguja e indicar la temperatura.

Un termómetro muy popular de carátula consiste en una tira bimetálica en forma de helicoide. Uno de sus extremos se sujeta a la caja y el otro a un vástago conectado a una aguja. A medida que la temperatura cambia, el movimiento de la helicoide hace que el vástago y su aguja también se muevan. Existen carátulas en tamaños de 1¾ a 5 plg (4.5 a 12.5 cm).

Estos termómetros de carátula son de construcción resistente y son razonablemente exactos (dentro del 1% de la escala) cuando se escogen apropiadamente. El tipo industrial de termómetros de mercurio dentro de capilar de vidrio es el medio más cómodo y económico para la medición no registrable de la temperatura en puntos accesibles del proceso.

El instrumento de tira bimetálica se emplea extensamente para control de arranque e interrupción en dispositivos sencillos tales como los de sistemas de acondicionamiento de aire.

Termómetros de expansión de fluidos

El instrumento más familiar de medición de temperatura, el termómetro de mercurio en capilar de vidrio, está diseñado para aplicaciones localmente montadas similares a las del termómetro bimetálico de carátula antes descrito. El instrumento se hace de construcción resistente encerrando el termómetro en una caja metálica. Mediante conexiones especiales el termómetro puede insertarse en orificios de tuberías o de recipientes. La escala de vidrio puede obtenerse inclinada a los ángulos que convengan.

Otros tipos de instrumentos de expansión de fluidos utilizan un sistema cerrado. El fluido que se expande ejerce una fuerza sobre un elemento espiral de presión (resorte), haciéndolo desenrollarse. Este movimiento se transmite a una pluma o aguja que se mueve a través de una escala calibrada en relación directa con la temperatura (Fig. 20-5). Los fluidos empleados son gases inertes (nitrógeno por lo general), líquidos (mercurio o líquidos orgánicos) y vapores (propano, éter metílico, éter o clorobenceno).

Los termómetros de presión llenos con líquido o gas deben ser compensados por los cambios en la temperatura ambiente. Si la temperatura a lo largo del extremo capilar en el resorte de presión es radicalmente diferente de la temperatura en el punto de calibración, las lecturas serán erróneas puesto que la expansión volumétrica en dichas áreas estará cambiada. Para superar este efecto, en oposición al resorte de presión medidor puede instalarse una tira bi-

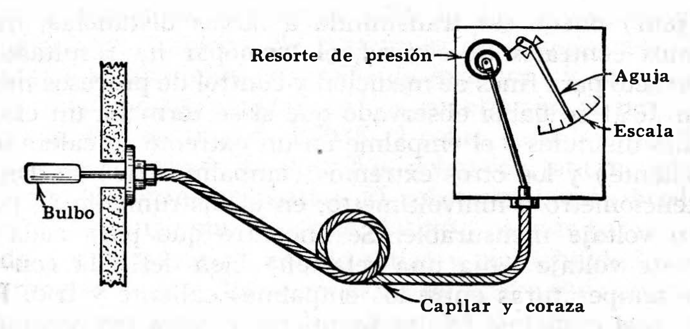


FIG. 20-5. Termómetro de expansión de fluido. [Reimpreso con autorización, D. P. Eckman, *Industrial Instrumentation.* John Wiley and Sons (1950).]

metálica o un segundo resorte de presión con un capilar (sin bulbo) adyacente al capilar de medición. Esta instalación nulificará los efectos producidos por la temperatura ambiente.

Los sistemas llenos con vapor no requieren tal compensación si el nivel del líquido permanece en el bulbo. La presión en el sistema debe corresponder a la presión de vapor del líquido en el bulbo, con independencia de las condiciones ambientes.

El uso, en las plantas de proceso, de los termómetros de presión por expansión de fluidos es muy extenso, particularmente en rangos de temperatura de 0 a 500°F. Con objeto de mantener la longitud del capilar en un valor mínimo, se puede usar un instrumento tipo transmisor. Este instrumento se localiza cerca del elemento primario y convierte el impulso de presión de la expansión en una señal eléctrica o neumática, la cual puede ser conducida a un departamento central de control. Dado que el dispositivo primario de sensibilidad es fundamentalmente un instrumento de presión, como elementos secundarios para indicar, registrar y controlar se pueden usar también elementos de instrumentos de tipo presión, tales como fuelles y elementos Bourdon (helicoidales o espirales).

Los termómetros de presión son relativamente baratos en comparación con los instrumentos termoeléctricos. El instrumento lleno con vapor es el más popular de los tres tipos. Es el de costo más bajo, no requiere compensación y es de respuesta rápida. Sin embargo, su escala no es lineal. De los tres tipos de termómetros, el que está lleno con mercurio es el más estable y sensible.

Instrumentos termoeléctricos de medición de temperatura

TERMOPARES

El termopar es el dispositivo más ampliamente utilizado para medición de temperaturas. Los potenciómetros de alta precisión hacen posible emplear termopares para temperaturas desde −300°F hasta 3 000°F. Debido a la facilidad con la cual la fuerza electro-

motriz (fem) puede ser transmitida a largas distancias, hasta departamentos centrales de control, el termopar ha resultado conveniente y exacto para fines de medición y control de procesos modernos.

Ya en 1821 se había observado que si se formaba un circuito de dos metales disímiles y el empalme en un extremo se calentaba (empalme caliente) y los otros extremos (empalme frío) se conectaban a un potenciómetro o milivoltímetro, en el instrumento se podía observar un voltaje mensurable. Se encontró que para cada par de metales este voltaje tenía una relación* bien definida con la diferencia de temperaturas entre los empalmes caliente y frío. Por consiguiente, si el empalme frío se mantiene a cierta temperatura constante, la temperatura del empalme caliente puede ser obtenida en un amplio rango de temperaturas midiendo el voltaje generado.

Evidencias experimentales y razonamientos basados en las leyes de la termodinámica han producido las siguientes reglas de significación práctica para la termometría industrial.

1. La fem desarrollada por la diferencia de temperaturas de dos empalmes es independiente de los gradientes de temperatura a lo largo de conductores homogéneos entre empalmes. Los efectos caloríficos por sí solos no producirán una corriente en un circuito homogéneo.†
2. Un tercer conductor puede ser introducido en un lado del circuito, tal como se observa en la Fig. 20-6*a*, sin cambiar la fem producida, siempre y cuando la temperatura a lo largo del conductor permanezca constante.
3. Un tercer conductor puede ser introducido en ambos lados del circuito, tal como se observa en la Fig. 20-6*b*, sin cambiar la fem producida, si los empalmes intermedios están a la misma temperatura. (La suma algebraica de los voltajes generados por varios conductores disímiles empalmados en un circuito es función únicamente de la temperatura.)

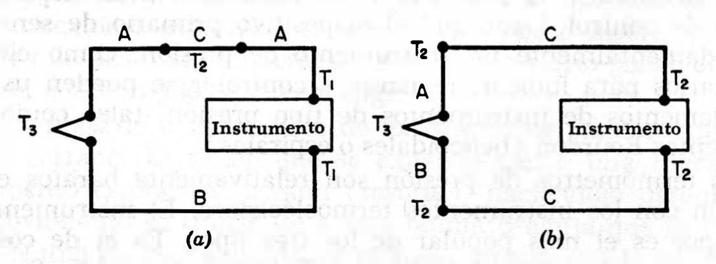


FIG. 20-6. Circuitos de termopar con un tercer conductor.

---

* Esta relación no es lineal pero se expresa con cierta aproximación mediante la ecuación:

$$\text{fem} = m\Delta t + n(\Delta t)^2$$

en donde Δt = diferencia de temperaturas entre los empalmes caliente y frío
m y n = constantes para cada termopar

† El conocido efecto Thomson se usa para describir la fem generada en un conductor homogéneo cuando existe una diferencia de temperaturas entre las terminales del conductor. Sin embargo, la distribución de temperatura a lo largo de los conductores no afecta la fem Thomson. Esta fem junto con la causada por la diferencia de temperaturas con los dos empalmes integra la fem total del "termopar".

COMBINACIONES DE TERMOPAR. En la Tabla 20-1 se muestran las combinaciones comunes de materiales de termopares. Cada par tiene ventajas particulares en grado de exactitud y rango de medición. El termopar cobre-constantán* es superior en el rango bajo de temperaturas. Por encima de 650°F el cobre se oxida rápidamente. A temperaturas inferiores de 200°F el cobre-constantán tiene mayor exactitud que el hierro-constantán. El cobre-constantán produce mayores fem en su rango que el par de platino y es más barato.

Debido a su bajo costo, amplio rango y confiabilidad, cuando se aplican apropiadamente, los termopares de hierro-constantán son los más extensamente utilizados. No obstante, el hierro está sujeto a oxidación, para evitar la cual deben tenerse ciertas precauciones.

El Cromel [Ni(90%), Cr(10%)]—Alumel [Ni(94%), Mn(3%), Al(2%), Si(1%)] fue desarrollado por su fabricante para usarse en atmósferas oxidantes en las cuales el hierro-constantán resulta inutilizable. Sus aplicaciones más importantes están en el rango de 1 400 a 2 300°F.[4] A altas temperaturas el par Cromel-Alumel no es satisfactorio en atmósferas reductoras (con menos de 2% de oxígeno).

El par platino-platino rodio, es más caro que los metales base y en plantas de proceso se usa básicamente para temperaturas superiores al rango de otros pares. El platino está sujeto a alteración por efecto de atmósferas reductoras y ciertos vapores e invariablemente se encierra, para protegerlo, en pozos herméticos a los gases.

El conductor comercial para termopares se fabrica con tolerancias estrechas y, al armarse, se debe ajustar con un grado de exactitud apropiado para la mayoría de los fines a los voltajes establecidos y publicados para termopares. A un costo más alto pueden obtenerse materiales de mayor exactitud certificada para trabajo preciso, como el de investigación.

POZOS E INSTRUMENTOS DE TERMOPARES. Los termopares industriales se hacen de diversos modos dependiendo del tipo. Los conductores de cromel-alumel y de hierro-constantán, por lo general se trenzan con dos vueltas y se sueldan en los extremos con un arco de carbono de corriente directa,[4] usando un fundente tal como bórax. Los extremos de cobre-constantán y de platino no se trenzan, sino que generalmente sólo se funden en forma de punta redonda. Para platino se usa un arco de carbono y para cobre-constantán un procedimiento de soldadura. En tamaño, los conductores comúnmente utilizados varían de 0.032 a 0.1285 plg (0.81 a 3.26 mm) de diámetro. El platino, por lo general, tiene un diámetro de 0.02 plg (0.51 mm).

Hay tantos procesos que implican fluidos corrosivos y fluidos bajo presión que rara vez se usan termopares descubiertos. En lugar de ello, el termopar se inserta en un pozo manufacturado el cual tiene

* El constantán es una aleación de cobre y níquel (50 a 65 de Cu y 50 a 35 de Ni).

conexiones a modo de poderlo montar en un tubo o recipiente a presión (Fig. 20-7). Los fabricantes de instrumentos ofrecen estos conjuntos completos con termopar, aisladores de cerámica con dos huecos para los conductores, pozo y cabeza terminal con tapa. Los materiales más comunes para pozos son el acero al carbón, los aceros inoxidables y los aceros al cromo.

La velocidad de respuesta de un conjunto de termopar (pozo y termómetro) puede ser aumentada y los errores del termopar disminuidos si se usan diámetros pequeños, pozos angostos y pares de poco peso. El error para la medición de temperatura de gases puede reducirse aún más si se aumenta el flujo alrededor del conjunto y si se interpone una pantalla de radiación entre las paredes del conductor y el conjunto del termopar. En todos los casos el pozo del termopar debe hacer un buen contacto con el cuerpo del pozo para poder asegurar una respuesta rápida.

MEDICIÓN DE LA FEM. Los instrumentos que se utilizan para registrar la fem en términos de temperatura y para controlar procesos con base en la temperatura medida, por lo general son circuitos tipo potenciométrico. La fem del termopar se balancea contra una fem conocida, producida por un acumulador a través de un conductor corredizo calibrado. El acumulador se estandariza periódica y automáticamente contra una celda estándar.

Varios métodos se usan para balancear la fem del termopar e indicar y registrar así la temperatura por movimiento del contacto sobre el conductor corredizo. El sencillo circuito del potenciómetro puede ser hecho a manera de realizar todas las operaciones de manera automática. El desbalance en un galvanómetro puede ser detectado mediante un sistema continuo el cual momentáneamente sujeta la aguja del galvanómetro en posición y luego mueve el conductor corredizo por medio de un motor hasta alcanzar el balance. Por muchos años éste fue el tipo estándar de instrumento de proceso. Sin embargo, más recientemente, instrumentos de alta velocidad, basados en circuitos electrónicos, mantienen un balance casi instantáneo o

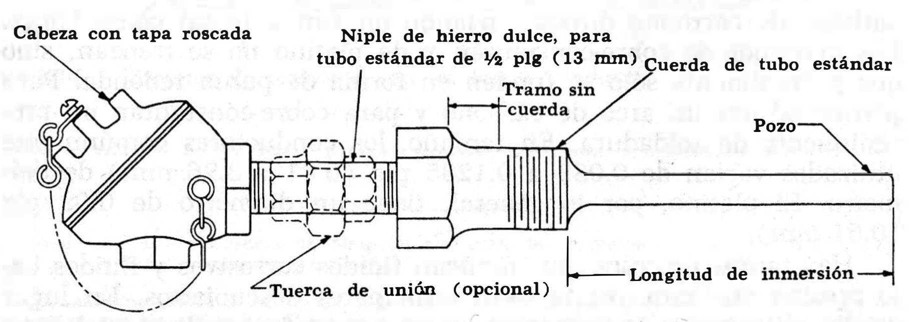


FIG. 20-7. Conjunto del termopar. (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

continuo. En varios de estos instrumentos, el galvanómetro ha sido reemplazado por un dispositivo que convierte la corriente directa del termopar en corriente alterna. Lo anterior es seguido por amplificación de voltaje, el cual es aplicado al motor. Estos instrumentos son rápidos, resistentes y en extremo exactos. La longitud de una gráfica de 12 plg (30 cm) puede ser atravesada en un segundo. Por consiguiente, ha sido posible ofrecer tales instrumentos para medición y registro de varios puntos diferentes de temperatura en una misma gráfica.

El empalme frío del circuito del termopar está en el instrumento. En vez de pretender mantenerlo a temperatura constante, se proporciona un compensador automático del empalme frío. Este compensador es una resistencia en el potenciómetro conectada en paralelo con el conductor corredizo. Está hecha de un material cuya resistencia eléctrica es sensible a los cambios de temperatura. El cambio en resistencia origina un movimiento en la posición de balance del conductor corredizo a manera de compensar los cambios de temperatura del empalme frío.

CONDUCTORES TERMINALES. Si se desea que las mediciones del termopar sean exactas se deben usar conductores terminales apropiados. Por lo general es impráctico emplear los conductores del termopar como conductores desde el empalme hasta un registrador remoto. Es usual que otros conductores terminales, que son más baratos y más fáciles de manejar, se conecten a los conductores más resistentes del termopar en la cabeza del pozo y sean conducidos al instrumento. Si las temperaturas en la cabeza y en el empalme frío del instrumento son las mismas, se pueden utilizar cualesquier conductores apropiados. Puesto que, por lo común, en las instalaciones de proceso estas dos temperaturas no son iguales, como conductores terminales se deben emplear conductores de propiedades termoeléctricas similares a las del termopar. El hierro-constantán y el cobre-constantán de menor diámetro que el conductor del termopar se emplean como conductores terminales para sus respectivos termopares. Es frecuente que el material del conductor terminal esté hecho de material sobrante del termopar, ya que sólo necesita ser similar al metal del termopar en el rango de temperatura del instrumento. El hierro y la aleación de cobre-níquel se usan para conexión a Cromel y Alumel, y el cobre y la aleación de cobre-níquel para conexión a platino y platino-rodio, respectivamente.

Los conductores terminales pueden ser aislados de muchas maneras dependiendo de la atmósfera. En el mercado hay aislamientos tales como esmalte, hule, asbesto, fibra de vidrio y algodón.

TERMÓMETRO DE RESISTENCIA

El termómetro de resistencia, que durante mucho tiempo ha sido un medio estándar para medición de temperatura en trabajo preciso

de laboratorio, está adquiriendo también bastante importancia como instrumento industrial. En rangos de temperatura de −300°F a 950°F, compite con el termopar. Aunque más caro, más voluminoso y de respuesta más lenta, tiene mayor sensibilidad y no requiere compensación de empalme frío.

La termometría de resistencia utiliza el aumento de resistencia de los metales con la temperatura. Un bulbo típico de termómetro, como el que se ilustra en la Fig. 20-8, consta de una resistencia arrollada de 1⅝ plg (41.4 mm) de longitud. El arrollamiento de Manganina conectado en serie se utiliza para ajustar las características de temperatura-resistencia. Estos bulbos se instalan en pozos similares a los de los termopares. El níquel es el elemento más popular para el material de la resistencia debido a su bajo costo y a que tiene un alto cambio de resistencia con la temperatura. El platino es más exacto y puede ser usado para mayores temperaturas.

El elemento de resistencia se hace formar parte de algún circuito de puente, tal como un puente de Wheatstone. Por medio de un acumulador se suministra una corriente directa. El cambio en resistencia del bulbo desbalancea el puente, y este desbalanceo es detectado y corregido de una manera similar a la descrita para circuitos de potenciómetros para termopares.

PIRÓMETROS ÓPTICOS Y DE RADIACIÓN

Los pirómetros ópticos o los de radiación se emplean para medir temperaturas por encima de los rangos de otros instrumentos. Los pirómetros de radiación miden la energía radiante total proveniente de un objeto caliente, enfocando la energía con una lente sobre una termopila (varios termopares conectados en serie). La termopila genera una fem proporcional a la energía radiante. Si un objeto que se está midiendo se aproxima a las condiciones del cuerpo negro,

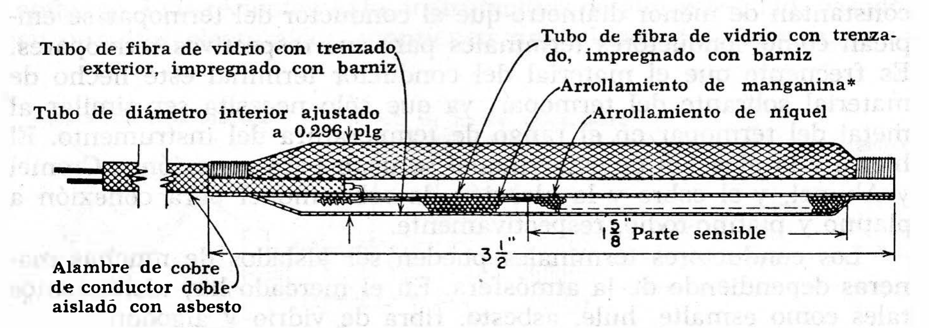


FIG. 20-8. Conjunto de termómetro de resistencia. (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

* Aleación que contiene principalmente manganeso, cobre y níquel. Puede también contener zinc, estaño y aluminio. (N. del T.)

tal como la flama de un horno, la energía transmitida es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del objeto.

El familiar pirómetro óptico de operación manual compara la intensidad de la radiación monocromática proveniente de un objeto hacia una fuente estándar ajustable. La radiación del objeto y la de una lámpara de tungsteno se comparan a través de filtros rojos. La corriente hacia la lámpara puede ser variada cambiando una resistencia hasta que las dos imágenes concuerden. El medidor se calibra para temperatura en términos de las variaciones de resistencia.

Un tipo de pirómetro óptimo automático utiliza dos celdas fotoeléctricas para comparar la energía del objeto caliente y la del filamento de una lámpara de carbono. La corriente de la lámpara se varía automáticamente para llevar las dos fotoceldas al equilibrio. Por lo tanto, esta corriente es proporcional a la temperatura y puede ser empleada para actuar un registrador. El instrumento es instantáneo y puede responder a un cambio de 200°F en menos de ⅗ de segundo. Por consiguiente, es valioso para medir temperaturas de objetos en movimiento.

Estos pirómetros de alta temperatura son más conocidos en las fábricas de acero, pero se usan en plantas químicas, especialmente para controlar hornos rotatorios.

Instrumentos medidores de presión

Manómetro tipo Bourdon

En las plantas de proceso, los dispositivos más comúnmente utilizados para medir la presión son el tubo sencillo de Bourdon y sus modificaciones. El tubo de Bourdon, tal como se muestra en la Fig. 20-9, consiste en un tubo metálico cerrado, hueco, de sección transversal elíptica. Se dobla en semicírculos, fijo en un extremo y co-

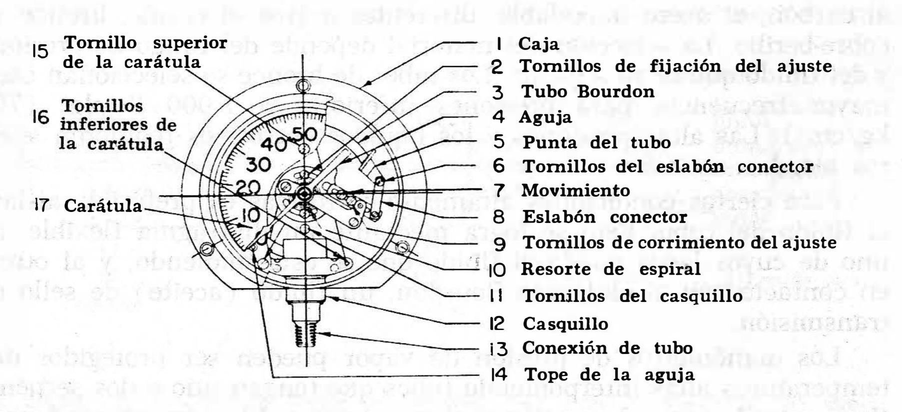


FIG. 20-9. Manómetro de presión, de tubo Bourdon. (Cortesía de Ashcroft Gage Division of Manning Maxwell and Moore, Inc.)

nectado en ese mismo extremo a la fuente de presión. La aplicación de una presión mayor que la atmosférica hace que el tubo tienda a desenrollarse, en tanto que un vacío origina su contracción. Mediante un mecanismo conector y un piñón y engrane, se hace que una aguja se mueva sobre una escala calibrada. En rangos de tamaño moderado, existe una relación aproximadamente lineal entre la presión y el movimiento de la escala.

Los manómetros tipo Bourdon más conocidos son los manómetros de carátula indicadora, los cuales son baratos, resistentes y exactos (de 0.5% del rango de la escala para el tipo industrial y de 0.5% de la lectura para modelos de laboratorio). Son comunes en cualquier parte de las plantas de proceso y están disponibles en varios rangos desde vacíos de 30 plg (76.2 cm) de mercurio, hasta presiones de 10 000 lb/plg^2 (705 kg/cm^2). También se producen manómetros probadores de laboratorio capaces de medir hasta 100 000 lb/plg^2 (7 050 kg/cm^2).

Aunque el elemento de tubo Bourdon sencillo puede ser empleado para mover un mecanismo de pluma de un registrador en rangos altos de presión (300 a 20 000 lb/plg^2; 21 a 1 400 kg/cm^2), los elementos Bourdon envueltos en espiral o en helicoide se usan con mayor frecuencia en instrumentos registradores, particularmente para los rangos más bajos de presión (0 a 4 000 lb/plg^2; 0 a 280 kg/cm^2). Para un diferencial dado de presión, el elemento en espiral plana o el elemento en envoltura helicoidal producen mayores flexiones en el extremo libre que el tubo de Bourdon sencillo. En aquellos elementos el movimiento es, en realidad, la acción combinada de varios elementos Bourdon individuales conectados en serie. Este mayor movimiento es necesario para operar, en los registradores y controladores, los dispositivos mecánicos, contactos eléctricos, sistemas neumáticos y plumas de registro apropiados.

Los materiales que se emplean para el tubo Bourdon son el acero al carbón, el acero inoxidable, diferentes aceros al cromo, bronce y cobre-berilio. La selección del material depende del rango de presión y del fluido que se va a medir. Los tubos de bronce se seleccionan con mayor frecuencia para presiones inferiores a 1 000 lb/plg^2 (70 kg/cm^2). Las altas presiones y los líquidos corrosivos requieren aceros aleados.

Para ciertas condiciones altamente corrosivas es preferible aislar el fluido del tubo. Esto se logra mediante un diafragma flexible, a uno de cuyos lados queda el fluido que se está midiendo, y al otro, en contacto con el elemento Bourdon, un fluido (aceite) de sello o transmisión.

Los manómetros de presión de vapor pueden ser protegidos de temperaturas altas interponiendo tubos que tengan uno o dos serpentines entre la toma de presión y el manómetro. El vapor se condensa en este enfriador atmosférico y queda atrapado en los serpentines.

De esta forma, la temperatura en el manómetro se mantiene por debajo de la del vapor.

Instrumentos de fuelle y diafragma

En los rangos más bajos de presión, inferiores a 30 lb/plg² manométricas y para vacío, se requieren elementos más sensibles que el tipo Bourdon para producir mediciones confiables. En estos rangos los fuelles y diafragmas metálicos operan con una sensibilidad mucho mayor.

En la Fig. 20-10 se ilustran varios elementos de fuelle. La presión mayor, que actúa en el exterior del fuelle de baja presión, tiende a comprimirlo haciendo que la aguja se mueva. El rango del instrumento está determinado por la rigidez del resorte que se localiza en el fuelle de sello, a la derecha. Aquí, como en otros instrumentos, el movimiento de la pluma puede conectarse a sistemas neumáticos o eléctricos para afectar el control de un proceso. Los elementos de fuelle se usan en rangos desde 100 plg (254 cm) de agua hasta 30 o 40 lb/plg² (2.1 o 2.8 kg/cm²) y a vacíos de 10 a 30 plg (25.4 a 76.2 cm) de mercurio.

Para los rangos más bajos de presión positiva que comúnmente se encuentran al medir tiros de hornos (0 a 40 plg, 0 a 102 cm, de agua) se usa un elemento de diafragma a base de un material como el cuero o el plástico. Este diafragma se mueve con los cambios de presión diferencial a través del mismo y el movimiento puede ser transportado a una aguja. Para presiones manométricas más altas, hasta de 5 lb/plg² (0.35 kg/cm²), se usan diafragmas metálicos (de latón o bronce).

Manómetros

Además del tipo conocido de manómetro de laboratorio, los manómetros de presión diferencial de mercurio y los manómetros sin

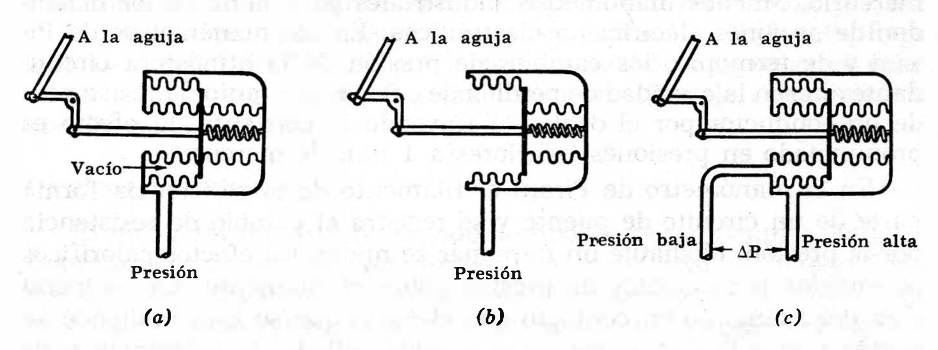


FIG. 20-10. Elementos de fuelle de presión. (*a*) Presión absoluta, (*b*) presión manométrica, (*c*) presión diferencial o vacío. (Cortesía de Taylor Instrument Company.)

mercurio o instrumentos de balanza de fuerza, discutidos en la sección "Medidores de Flujo", proporcionan una medición confiable de diferenciales de presión hasta de 600 plg (15 m) de agua. Para presiones bajas, con frecuencia se usa alguno de los diversos elementos de campana de presión diferencial. Estos elementos consisten de una cubeta o campana invertida en un baño de aceite. Una toma de presión termina en el interior de la campana y la otra termina afuera. Entonces la campana se mueve hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la presión diferencial. Este movimiento se transporta a una pluma. Se dispone de muchos otros instrumentos manométricos o similares, particularmente para el rango de baja presión.

Medición eléctrica o electrónica de la presión

Manómetro de deformaciones

Este manómetro, que con tanto éxito se ha usado para análisis de esfuerzos de elementos estructurales sujetos a carga, ha sido adaptado para la medición de presiones de proceso y como tal se denomina transductor de presión. La fuerza que actúa sobre el manómetro cambia la tensión y también la resistencia eléctrica de un conjunto de conductores. Este cambio de resistencia es proporcional a la presión aplicada y puede ser medido mediante un instrumento, a base de un puente de Wheatstone similar al descrito para los termómetros de resistencia. Se construyen unidades para rangos de presión de 100 a 50 000 lb/plg^2 (7 a 3 500 kg/cm^2). Son resistentes y adaptables al control de proceso. El impulso eléctrico puede ser transportado a grandes distancias hasta el punto de registro y control.

Manómetros de vacío (vacuómetros)

En rangos de 1 a 50 mm de mercurio se usan manómetros de mercurio. Muchos manómetros industriales para altos vacíos dependen de acciones eléctricas o electrónicas. En los manómetros de Pirani y de termopar, los cambios de presión de la atmósfera circundante alteran la cantidad de pérdida de calor y, por tanto, la resistencia de un conductor por el cual está fluyendo la corriente. El efecto es pronunciado en presiones inferiores a 1 mm de mercurio.

En el manómetro de Pirani el filamento de la resistencia forma parte de un circuito de puente y se registra el cambio de resistencia por la presión. Mediante un termopar se miden los efectos caloríficos producidos por cambios de presión sobre el filamento. La temperatura del filamento en contacto con el vacío que se está midiendo se compara con la que existe en una celda sellada de referencia o de compensación. El rango de estos manómetros va desde 1 micrón hasta unos 700 micrones de mercurio, de presión absoluta.

Para presiones inferiores a un micrón de mercurio se usan manómetros de ionización absoluta. Estos manómetros emplean un triodo con emisión constante de electrones. La atmósfera en este bulbo es la misma que la del vacío que se está midiendo. El flujo de corriente del bulbo es proporcional al número de iones formados por el bombardeo de electrones de las moléculas de gas en el bulbo. El número de iones formados es, a su vez, proporcional al número de moléculas de gas en el bulbo, el cual es directamente proporcional a la presión del bulbo. Los filamentos de estos manómetros se dañan con presiones mayores de un micrón. Un manómetro similar, que usa una fuente permanente de radio para producción de iones a partir de las moléculas de gas, no requiere filamento y puede, por consiguiente, operar con éxito en el rango de presiones atmosféricas normales inferiores a 0.1 micrón absoluto de mercurio.

Instrumentos de nivel de líquidos

De tipo de presión diferencial

Los instrumentos de presión diferencial a menudo se usan como instrumentos de nivel de líquidos. Por ejemplo, un lado del manómetro puede ser conectado con algún punto del fondo de un recipiente y el otro lado con algún punto de la parte superior del nivel del líquido. La presión diferencial entre los dos puntos es una indicación del nivel del líquido. La presión sobre la conexión inferior incluye el cabezal estático de líquido así como la presión del recipiente. En tanques abiertos únicamente se requiere una conexión y la del fondo. Este tipo de instrumento frecuentemente se utiliza para indicación de nivel de sólidos fluidificados, cuando un dispositivo de tipo desplazamiento no resulta satisfactorio.

Para evitar problemas mecánicos con fluidos que pudieran asentarse, solidificarse o producir corrosión, otros fluidos —tales como algún gas inerte o aire— pueden ser inyectados lentamente en el recipiente,* en los dos puntos diferenciales. La diferencia de presión en el fluido inyectado es igual a la presión estática del líquido. Para indicar el nivel del líquido por el mismo método de presiones diferenciales, con algunos fluidos pueden usarse simples manómetros tipo Bourdon.

De tipos de flotador

El indicador de nivel de líquido de tipo desplazamiento o flotador es probablemente el instrumento más común del nivel de líquido. Este instrumento consiste de un dispositivo flotante. Mediante tubería este dispositivo está conectado directamente a dos puntos del tanque o recipiente. Los cambios en el nivel del líquido mueven el flotador.

* El flujo de aire puede ser controlado por medio de un rotámetro o de un burbujeador visual.

El tipo más simple consiste de una esfera flotadora conectada por medio de un brazo a una flecha que atraviesa el casco de la cámara o recipiente (Fig. 20-11). El peso del flotador se ajusta con contrapesos a modo que en todo su rango permanezca a medio sumergir. De esta manera, la máxima cantidad de líquido es desplazada para todas las porciones del flotador, y así se genera la máxima fuerza tanto para el nivel superior como para el inferior. Esta fuerza es transmitida por una palanca hacia una válvula de control e indicador directamente conectados, o hacia un relevador neumático que

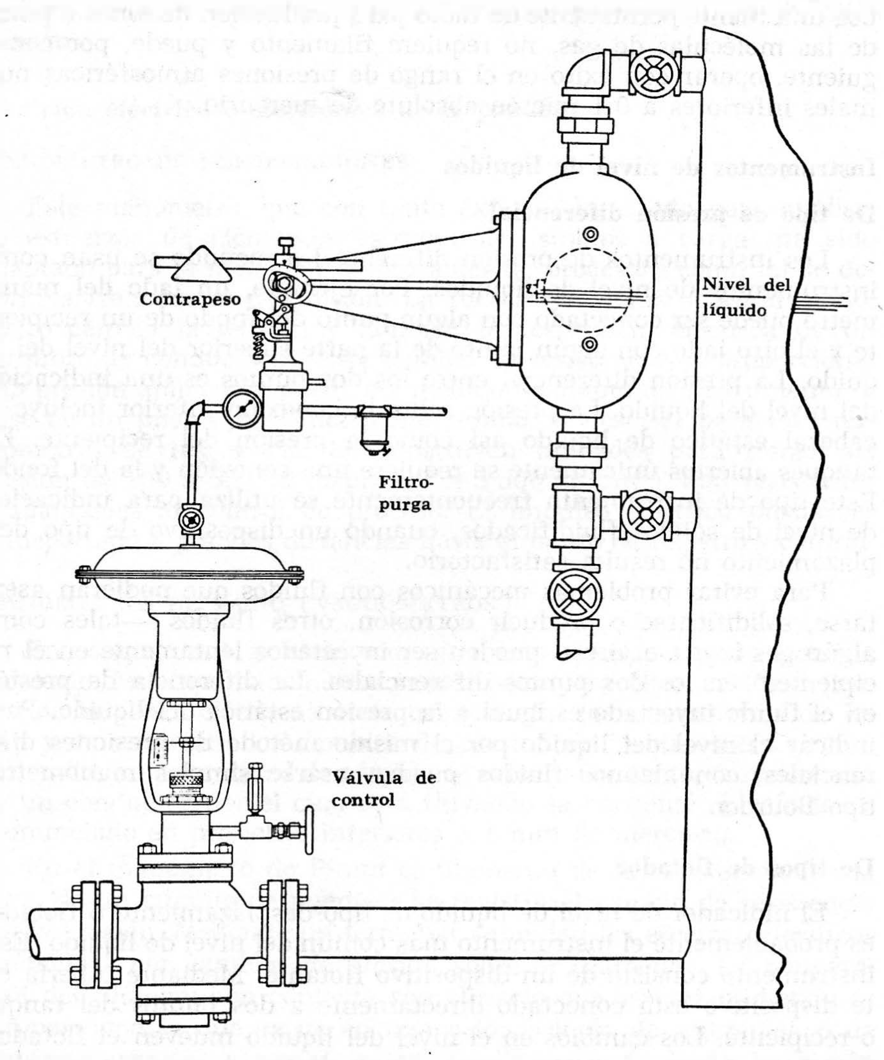


Fig. 20-11. Controlador y válvula de nivel tipo flotador. (Cortesía de Mason-Neilan Regulator Company.)

transmite a un registrador o controlador una presión de aire proporcional al nivel. El rango de operación de estas unidades es estrecho (aproximadamente 20 plg del máximo cambio de nivel).

El flotador de tipo desplazamiento, a diferencia de la esfera flotadora, varía en desplazamiento dependiendo del nivel. Se diseña un flotador cilíndrico, largo, a modo que flote libremente en un nivel mínimo o cero y esté completa o aproximadamente sumergido en el nivel máximo. La Fig. 20-12 ilustra los principios básicos mediante una sencilla demostración. La variación de fuerza en una báscula de resortes y el movimiento del flotador están ilustrados pa-

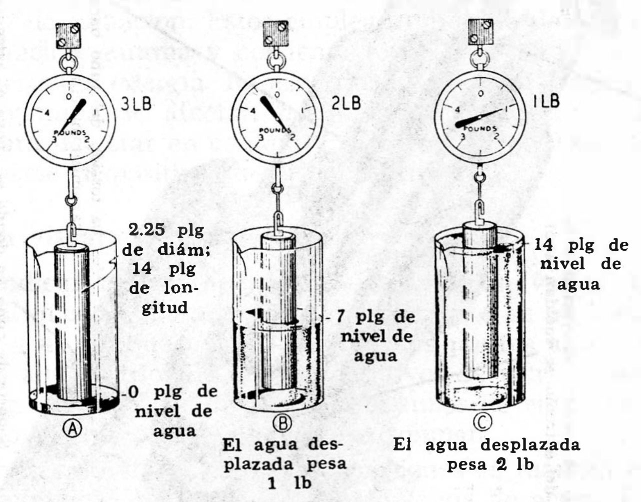


Fig. 20-12. Principios de los medidores de desplazamiento. (Cortesía de Mason-Neilan Regulator Company.)

ra tres niveles de líquido. Si en lugar de una báscula de resortes se usa, como en la Fig. 20-13, un tubo de torsión, la torsión del tubo es proporcional al nivel del líquido. Luego, se hace que este movimiento opere un sistema neumático el cual transmite una presión proporcional de aire a un registrador, alarma o controlador.

El momento que actúa sobre el tubo de torsión es igual a la fuerza del flotador hacia abajo multiplicada por la longitud de la varilla del flotador. El empuje del flotador afecta la magnitud del momento de giro. De esta forma, mediante la selección apropiada de la densidad y dimensiones del flotador y de la longitud de su brazo, se puede diseñar el instrumento para la sensibilidad y exactitud requeridas para un trabajo dado.

El rango de los flotadores tipo desplazamiento es de 14 plg a aproximadamente 120 plg. Hay flotadores muy exactos, en especial en fluidos de baja densidad. Su alta sensibilidad también los ha hecho muy populares para control y medición de nivel en interfases.

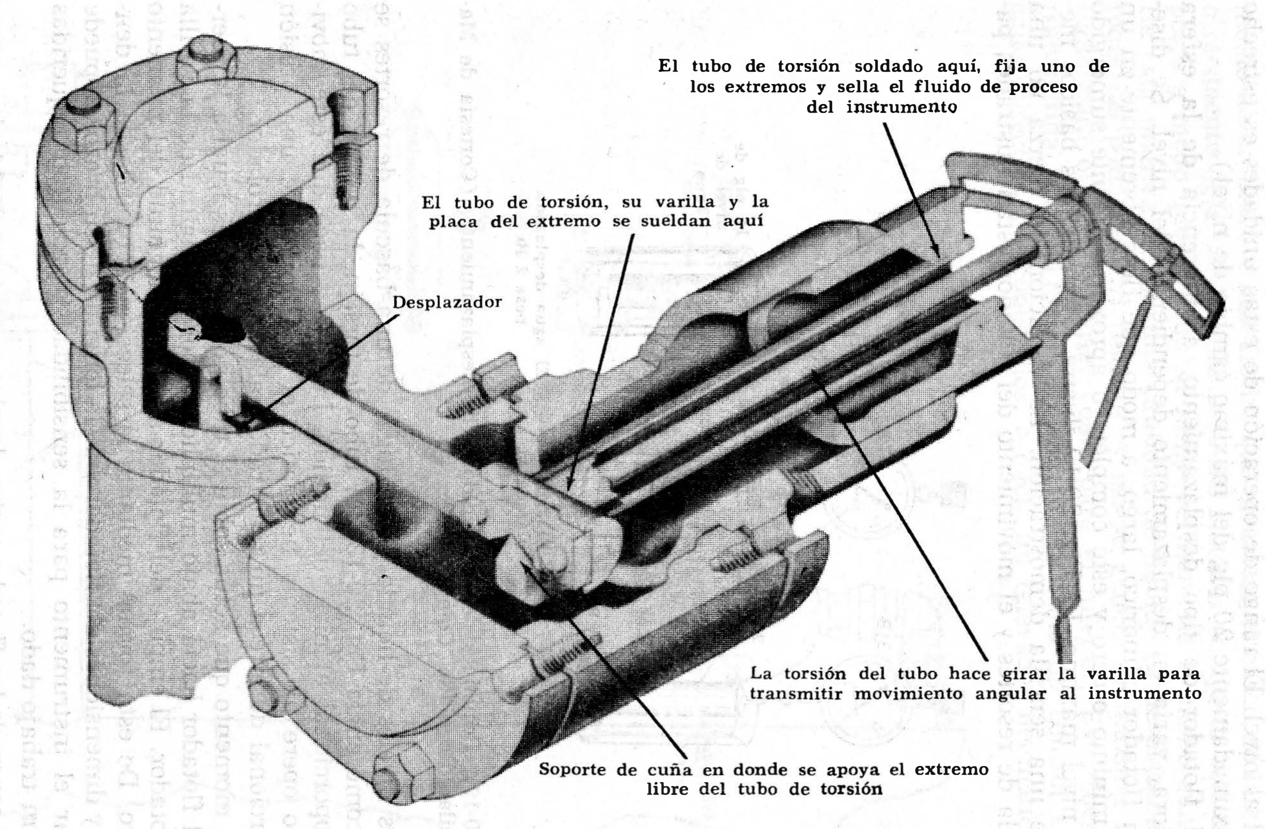


FIG. 20-13. Medidor de desplazamiento de tubo de torsión. (Cortesía de Mason-Neilan Regulator Company.

Tipos diversos

Existen otros muchos tipos de dispositivos medidores de nivel. Para indicar niveles puede usarse un diafragma colocado en el fondo de un tanque abierto. El movimiento del diafragma puede ser balanceado por un sistema neumático de balanza de fuerza y la presión resultante de aire se puede utilizar como una medida de la altura del líquido. Estas unidades son muy sensibles y particularmente valiosas para líquidos viscosos con los que no funcionan bien los instrumentos tipo flotador.

También se puede disponer de diversos dispositivos electrónicos, eléctricos y de radiación. Estos emplean unidades de celdas fotoeléctricas, radiación gamma y corriente alterna de alta frecuencia. La transferencia de energía fotoeléctrica, las altas frecuencias y la radiación gamma se afectan por líquidos interpuestos. Por consiguiente, para detectar en cualquier momento la posición de un nivel pueden usarse dispositivos sensibles apropiados.

Indicadores visuales o manuales de nivel

Para indicar niveles de líquidos se fabrican varios dispositivos visuales. El más ampliamente utilizado consiste en un tubo de vidrio conectado a un tanque o recipiente en sus puntos alto y bajo. Para recipientes altos, varios de tales dispositivos de vidrio pueden ser conectados en el rango por medirse. Estos tubos de vidrio están provistos con protectores para evitar que se rompan.

Los niveles de vidrio para altas presiones se montan en una cámara maquinada a partir de una barra sólida de acero. Existen dos estilos principales. Uno, tiene bloques gruesos de vidrio plano, tanto al frente como en la parte posterior (nivel transparente), y otro sólo tiene el frente de vidrio. El vidrio frontal de este último está cortado a manera de producir varias superficies de vidrio o prismas que refracten la luz. La refracción de la luz es mayor en la parte del nivel que contiene líquido, la cual se ve negra, en tanto que la parte sin líquido se ve clara.

El nivel transparente se usa para instalaciones en las que se requiere conocer el color del líquido que se va a medir. En todas las demás instalaciones se usa el otro nivel de refracción, el cual es más fácilmente legible.

En el comercio existen diseños que proporcionan medios para calentar o enfriar el fluido del nivel. El medio de calentamiento o enfriamiento se conduce a través de un tubo sujeto a la parte posterior del nivel, o bien, dicho tubo puede estar en el seno de la cámara líquida.

Los niveles de alta presión se han utilizado con gran éxito. Son de construcción resistente y por lo general exceden los requerimientos de los diversos códigos para recipientes a presión.

Para medir niveles en grandes tanques de almacenamiento, algunas veces se usan flotadores conectados a una cinta móvil. No obstante, el procedimiento manual es el método más antiguo para la medición de niveles en tanques de almacenamiento. El líquido que se adhiere a una cinta metálica graduada, la cual se hace bajar manualmente hacia adentro del tanque, indica el nivel medido.

Medición del movimiento

Dispositivos tacométricos

Para prácticamente cualquier velocidad se pueden obtener tacómetros de varias clases. Por lo general, los tacómetros para máquinas de alta velocidad (7 000 a 10 000 rpm), tales como ciertos generadores de turbina y compresoras centrífugas, son del tipo de vástago vibratorio. Este instrumento se utiliza básicamente para indicación, debido a que su mecanismo indicador tiene muy poca o ninguna fuerza de salida. Otros instrumentos emplean principios estroboscópicos o un dispositivo generador impulsado, el cual a su vez tiene su fem sensibilizada por medio de un instrumento trasladador para indicar, registrar o controlar.

Casi todas las máquinas de alta velocidad, como las turbinas, están equipadas con dispositivos reguladores de velocidad actuados por fuerza centrífuga. El dispositivo primario gira a cierta relación directa de velocidad con la máquina. Conforme la velocidad aumenta, unos contrapesos actuados por fuerza centrífuga operan una válvula que admite aceite en un sistema hidráulico; éste, a su vez, actúa sobre una válvula de diafragma o pistón, la cual controla el flujo de vapor a la máquina. En ciertas unidades, el dispositivo primario puede estar conectado directamente a la válvula de control, aunque el sistema hidráulico permite una mayor flexibilidad. El aceite utilizado se toma directamente del sistema de lubricación de la turbina. Dichos reguladores son primordialmente dispositivos de seguridad, ya que con una disminución súbita de carga la máquina podría fácilmente alcanzar velocidades críticas.

Controles límite

El dispositivo tipo límite generalmente es un contacto eléctrico que abre o cierra a límites preestablecidos. El actualmente común ojo eléctrico, como se utiliza para abrir puertas por interrupción de un haz de luz, es una simple ilustración de un dispositivo límite. La interrupción de un haz de luz cambia la energía de salida de una celda fotoeléctrica, cambio que puede ser utilizado para operar microinterruptores y relevadores giratorios.

Instrumentos contadores

El tipo más simple de dispositivo totalizador o contador es el de disparo. Un trinquete hace girar un diente, correspondiente a una unidad, en cada ciclo de un disco numerado. A su vez, el siguiente disco consecutivo es movido una unidad por cada revolución del primer disco.

Mediciones físicas y químicas

En las plantas de proceso modernas, muchas funciones del laboratorio de control han sido desplazadas por instrumentos automáticos diseñados para medir en forma continua las propiedades de una corriente que fluye en un proceso. El desarrollo de técnicas analíticas instrumentales para el laboratorio fue estrechamente seguido por modificaciones de estos instrumentos para usarse como analizadores de corrientes que pudieran ser instalados en la planta.

Los procesos que requieren una medición física o un análisis químico del producto se ven agobiados por un excesivo retraso cuando los operadores deben esperar los resultados de un laboratorio de control antes de cambiar condiciones. Aun cuando el costo inicial pueda ser alto, el empleo de analizadores de corrientes, tales como los espectrofotómetros de infrarrojo, ha resultado beneficioso en procesos que requieren un control de calidad rígido. El registro continuo elimina retrasos y evita la producción de grandes cantidades de producto que no cumplen las especificaciones requeridas.

En la Tabla 20-2 se presenta una lista de algunos de los instrumentos utilizados para medir propiedades físicas y químicas. Estos instrumentos han sido adaptados para análisis continuo de corrientes. Algunos de estos instrumentos son costosos y en tales casos la decisión de usarlos debe estar basada en un cuidadoso estudio económico. No sería aconsejable, por ejemplo, un analizador de infrarrojo cuando una temperatura de proceso en un punto crítico pudiera ser estadísticamente correlacionada con la calidad del producto.

Una lista como la de la Tabla 20-2 está sujeta a cambios rápidos. Cada año se mejoran los instrumentos existentes y se introducen otros nuevos.

CONTROL DE PROCESO

Generalidades

Casi todas las aplicaciones de control de proceso para las plantas de proceso implican un ajuste en la velocidad o un cambio en la dirección del flujo de fluidos. Los elementos de control constan de un dispositivo primario o sensible, de un dispositivo secundario o de traslación, conocido generalmente como instrumento, y de un tercer elemento que efectúa el cambio en las propiedades de la co-

TABLA 20-2. INSTRUMENTOS PARA CONTROL DE PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS Y PARA LA MEDICION DE CORRIENTES CONTINUAS*

INSTRUMENTOS DE QUIMISORCION NO REVERSIBLE

Método	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Orsat automático	Cambio de volumen de una muestra de gas a presión constante, antes y después de absorción en reactivos químicos.	Por lo general, análisis de ácidos que forman gases, por ejemplo, SO_2, CO_2, CO, etc.	0–100%	Principio del Orsat básico, 0.2% del teórico. Instrumentos industriales automáticos, 0.5%–10% del rango.	Opera en muestreo intermitente discontinuo, con un ritmo cíclico de 2 a 3 minutos. Usa reactivo líquido de absorción química, selectivo para el gas analizado. El reactivo se consume y debe ser sustituido.
Puente de presión	Pérdida de presión en series de orificios o puente de presión, como resultado de absorción química.	Idem.	0–50%	0.5%–10% del rango.	Opera sobre muestra gaseosa de flujo continuo. Generalmente usa reactivo absorbente seco. El reactivo se consume y debe ser sustituido.

INSTRUMENTOS DE QUIMISORCION REVERSIBLE

Los instrumentos de los tipos arriba descritos emplean absorbentes no reversibles. El reactivo cambia en composición química por efecto de la muestra de gas y debe ser sustituido. Los absorbentes reversibles se comportan como catalizadores y se ponen en equilibrio con la concentración de gas y alguna propiedad física del absorbente. Estos absorbentes no se "consumen", excepto por "envenenamiento".

Método	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Oxidación catalítica. Reducción	Resistencia eléctrica de catalizador de esponja de plata colocada en lana de vidrio contenida en la celda analítica.	Análisis de oxígeno.	No establecido.	No establecida.	Sensible a pequeñas concentraciones de O_2.
Combustión catalítica	Elevación de temperatura del catalizador, por ejemplo, Hopcalite o permanganato de plata contenido en la celda de análisis de gas.	Análisis de gases que sufren combustión catalítica, por Ej., CO, NH_3. etc.	Cantidades, huella y concentraciones bajas, inferiores a 0.1%.	0.005% en rango de 0.01%: 5 ppm (de exactitud) en rango de 10 ppm a 200 ppm de CO, o 2% del O_2 teórico en rango de 0.001% a 0.2%.	Aplicable a análisis de flujo continuo. Vulnerable a humedad en la muestra.

TITULOMETROS

La titulación implica la medición de la concentración de un material desconocido, en virtud de su reacción química cuantitativa reversible con un reactivo químico de concentración conocida; y el uso de un elemento primario apropiado para detectar la *equivalencia* química de la reacción. Los métodos titulométricos se basan en una relación volumen-concentración y se resuelven midiendo el *volumen* de reactivo y licor de proceso. Los instrumentos sirven para el proposito de detectar la equivalencia del punto de vire.

Tipo	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Potenciométrico	Diferencia de potencial entre un electrodo indicador apropiado y un electrodo estándar de referencia.	Medición de concentración *molecular* total de electrólitos.	Rango de baja concentración, inferior a 10%.	En condiciones favorables, bastante abajo de 0.5%. Las "interrupciones" de potencial pobre pueden reducir las exactitudes a valores del 1 al 5% de los teóricos.	Aplicable a control de proceso continuo. De utilidad en la medición de la acidez total. Restringido primordialmente a soluciones acuosas.

FOTOMETROS DE FILTRO

En su sentido original, la fotometría se designó como la fase de la radiometría que trataba de la medición de la luz visual. Su connotación en instrumentación para análisis se habia extendido para abarcar todos los tipos de instrumentos que miden absorción de energia a una longitud de onda especificada en todo el espectro electromagnetico. La magnitud de absorción (de la radiación monocromática) es una función de la concentración, de acuerdo con la ley de Beer. En este capítulo se tratan únicamente los instrumentos no dispersores.

Tipo de instrumento	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
(*a*) Luz visible	Porcentaje de transmisión de luz monocromática, en el rango visible, comparado con un estándar.	Colorímetros como los arriba descritos.	Colorímetros como los arriba descritos.	El uso de fotoceldas en sustitución del ojo humano aumenta la exactitud diez veces en relación con los colorímetros.	Es, probablemente, el más ampliamente utilizado de todos los instrumentos de laboratorio. Los instrumentos de doble haz se usan en análisis de flujo continuo y en control.
(*b*) Ultravioleta	Porcentaje de transmisión de energía monocromática, en el rango de 2500A° a 3650A°. Por lo general se compara con un estándar de referencia.	La absorción de energía UV por dobles ligaduras conjugadas, moléculas con estructuras de anillo y ciertas moléculas inorgánicas, proporciona una medida de la concentración.	Muy apropiado para cantidades huella y concentraciones inferiores a 10%.	0.1% a 5% de la teórica.	Apropiado para analizar bajas concentraciones de H_2S, Cl_2, $C_6H_5Cl_3$, xileno, acetona, C_2Cl_2, O_3, anilina, CS_2. Aplicable a control de proceso continuo.
(*c*) Infrarrojo	Porcentaje de transmisión de energía monocromática, en el rango de 2.5 a 25 micrones, en comparación con un estándar.	Generalmente en análisis de gases que absorben energía infrarroja. También se ha aplicado a líquidos en análisis de líquidos.	Rango de baja concentración. En general, inferior a 20%.	0.1% a 10% de la teórica, dependiendo de condiciones específicas. La sensibilidad puede ser aumentada por "ensanchamiento por presión". Análisis de "alto cono", limitado por la saturación de la sensibilidad.	Son los instrumentos mejor adaptados al análisis gaseoso, porque la condición de un constituyente que exhibe una fuerte absorción en un campo débil de interferencias, es más favorecida por los gases que por los líquidos.

* Reimpreso con autorización. M. F. Behar (Editor). *Handbo ok of Measurement and Control, Instruments and Automation,* 27. Núm. 12, 109-115, Parte 2 (1954).

TABLA 20-2. INSTRUMENTOS PARA CONTROL DE PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS Y PARA LA MEDICION DE CORRIENTES CONTINUAS* (*Continuación*)

REFRACTOMETROS

El índice de refracción es una función aditiva que constituye una medida de la concentración de mezclas líquidas cuando el volumen total de la solución es igual a la suma de los volúmenes de sus constituyentes. O sea que la refracción específica de la refracción molecular es característica de los compuestos químicos. La dispersión especifica constituye una medición del índice de refracción a dos diferentes longitudes de onda de luz y expresa una función c racterística de la composición del líquido. Los sólidos transparentes u opacos pueden ser medidos pero, en la mayoría de los casos, la medición industrial del índice de refracción se restringe a mediciones de líquidos.

Tipo	Descripción	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Método de la desviación mínima	Se hace un prisma del material cuyo índice de refracción se va a determinar. El ángulo de desviación de la luz se relaciona con su índice de refracción.	Medición de sólidos o líquidos transparentes. Un prisma hueco de vidrio, a través del cual se circula un líquido, se ha aplicado a control de proceso continuo.	Ilimitado. Este es el método clásico para determinaciones fundamentales. El rango del instrumento para fluidos industriales es de 1.1500 a 1.4700.	Muy alta. Véase L. W. Tilton, *U.S. Bureau Stds., J. Res.*, Vol. 14 P. 393 (1935) para la discusión de factores que afectan la exactitud.	El más amplio rango de los métodos industriales comunes basados en refractómetros. Véase *U.S. patent* 2 413 208. Los instrumentos de tipo industrial están restringidos a fluidos transparentes de baja presión.
Método de reflexión total	Un prisma transparente, cilíndrico o trapezoidal, se rodea por, o se pone en contacto con, la solución que se va a medir. La proporción de luz tr nsmitida a luz difundida se relaciona con la diferencia de índices entre el prisma y la solución.	Medición de fluidos opacos o transparentes, a presiones atmosféricas o elevadas.	Limitado. Depende del índice relativo entre el prisma y el fluido medido. Rango de presión manométrica: 0—150 lb/plg²	± 0.00004 a ± 0.00005	Rango limitado. El principio se adapta bien a instrumentación industrial.
Tipo de inmersión de ángulo crítico	Un prisma bañado por, o sumergido en, el fluido por medir refracta la luz y produce un campo iluminado y oscuro dividido por un "rayo de índice crítico".	Medición de fluidos transparentes.	Rango generalmente estrecho, es decir, 0.04 (1.32 a 1.36).	Por lo general, de ± 0.00003 a ± 0.00004.	Unicamente se conoce el refractómetro registrador comercial.
Refractómetro diferencial	Un haz de luz que pasa a través de dos líquidos divididos se refracta en función de la diferencia de índices de los dos fluidos.	Diferencia de concentración de dos fluidos. O composición en porcentaje del fluido de prueba, en comparación con el constituyente puro.	Rango de cobertura usualmente ngosto, pero su sensibilidad es alta. Su rango de presión es bajo.	Rango de toda la escala, 0.0002; sensibilidad, 0.000002 a 1% de exactitud. Toda la escala a sensibilidad mínima, 0.01 a 1% de exactitud.	Apropiado para análisis de corrientes continuas.

DENSIDAD Y GRAVEDAD ESPECIFICA

Típo de instrumento	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Método del diapasón	Frecuencia resonante de vibración de un diapasón o cavidad resonante a través de la cual circula el fluido de prueba.	Medición y control de densidad de fluidos a presiones altas o bajas.	Rango y exactitud dependen de la densidad relativa entre el diapasón y el fluido de prueba. Para fluidos industriales de gravedad específica 1.0 a 1.89, exactitud 100 ppm.		Aplicable a medición y control de flujos de proceso continuo. No hay flujo crítico.
Hidrómetro parcial o totalmente sumergido	Acoplamiento magnético en el puente del transformador que rodea al hidrómetro, o intensidad del haz de luz interceptado por la cabeza del hidrómetro.	Mediciones de gravedad específica de líquidos a presión atmosférica.	Mediciones de rango completo de gravedad específica, con espacios de escala de 0.005 a 0.05.	0.0002 o 3% del rango, lo que resulte mayor.	Satisfactorio para mediciones de flujo continuo, con excepción de los límites estrechos críticos a flujos exteriores.
Flotador totalmente sumergído	Presión de aire de un piloto neumático resultante de la fuerza de empuje sobre el flotador totalmente sumergido.	Mediciones de densidad o gravedad específica de líquidos a presiones atmosféricas o muy altas o vacío.	Rango usual de cobertura: gravedad específica de 1.0 a 2.9, dependiendo de las dimensiones del flotador.	Aproximadamente 0.01 a 0.005 unidades de gravedad específica.	Instrumentos industriales, resistentes. Límites estrechos críticos a flujos exteriores.
Picnómetro registrador	Presión de aire que contrarresta el peso de una esfera de volumen fijo a través de la cual la solución de prueba fluye continuamente.	Mediciones de densidad o gravedad específica de líquidos a presiones altas o normales.	Cobertura de todo el rango en espacios de escala de 0.05 o 0.1 de gravedad específica.	0.0005 a 0.001 de gravedad específica.	El instrumento es insensible al flujo en un amplio rango.
Tubo de burbuja neumática o diafragmas de aire sumergidos en la reacción.	Diferencia de retropresión entre dos tubos de burbujas de aire sumergidos a diferentes elevaciones.	Medición de densidad o gravedad específica de liquidos en recipientes de proceso o cámaras de flujo continuo.	Rango usual de aplicación: gravedad específica de 0.8—2.0.	Presión correspondiente a 0.1—1 plg de columna de agua.	El aire debe burbujearse a velocidad constante. Aplicable a suspensiones y mediciones bajo presión dentro de límites.

* Reimpreso con autorización. M. F. Behar (Editor). *Handbook of Measurement and Control, Instruments and Automation*, 27, Núm. 12, 109-115 Parte 2 (1954).

TABLA 20-2. INSTRUMENTOS PARA CONTROL DE PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS Y PARA LA MEDICION DE CORRIENTES CONTINUAS* (*Continuación*)

TIPOS DIVERSOS

Tipo de instrumento	Efecto medido	Aplicación	Rango	Exactitud	Observaciones
Conductividad térmica	Resistencia eléctrica (nominal de 5 a 20 ohms) de un conductor calentado (0.002 plg) a corriente o potencial constante en contacto con el gas de análisis.	Análisis de gases que tengan conductividades térmicas detectables, por ejemplo, H_2, Cl_2, CO_2, SO_2, etc.	0–10%, 30% o 100%, dependiendo de la composición del gas.	Por lo general, 1 a 15% de la teórica. El error puede ser de 100% o más si el instrumento no se aplica apropiadamente.	Uno de los instrumentos más prácticos, dentro de sus limitaciones, para análisis industriales de gases.
Conductancia eléctrica	Resistencia eléctrica de corriente alterna de una solución contenida entre electrodos apropiados.	Análisis de soluciones, por ejemplo, concentración de H_2SO_4, pureza del agua, fugas de condensadores, concentración de sal, etc.	Puede ser limitado o tener cobertura de 100%, dependiendo de las características de la solución. Aplicable a análisis de soluciones diluidas.	Del 0.1% al 10% de la teórica, según la aplicación.	El mantenimiento del electrodo es el factor limitante. La corriente directa puede ser empleada por encima de 1 megohm de resistencia medida, en concentraciones bajas.
*p*H	Diferencia de potencial de corriente directa entre un electrodo indicador (generalmente de vidrio) y un electrodo fijo de referencia. (Aproximadamente 60 mv por cambio de *p*H.)	Medición de acidez activa en solución, principalmente acuosa.	*p*H 0–14	Generalmente 0.1 de *p*H para instrumentos industriales.	Disponibles como controladores de procesos continuos.
Procesos de combustión	Resistencia eléctrica (temperatura) de un conductor caliente, el cual sostiene la combustión del gas de prueba y el combustible reactivo. O conductividad térmica antes y después de la combustión.	Análisis de gas oxígeno o análisis de gases combustibles.	0–5%; 0–25% 0–30%	0.25% del rango. 5% de la teórica.	Instrumentos industriales para medición y control de flujo continuo.
Celdas electrolíticas polarizadas	Corrientes electrolíticas de celdas en las cuales el cátodo es despolarizado por el gas de prueba que se difunde a través de paredes porosas.	Análisis de oxígeno.	0–½% O_2 0–25% O_2	Rango bajo, 0.01% de la teórica. Rango alto, 0.25% de la teórica.	Instrumento de análisis continuo. Limitado a gases libres de Cl_2, SO_2 y despolarizadores similares.
Lavado y extracción	Conductividad térmica de un gas lavado a partir de una solución por medio de un gas lavador reactivo apropiado.	Oxígeno disuelto e hidrógeno disuelto, en agua de alimentación de calderas.	0–0.2; 0–0.5 y 0–1.0 ppm de O_2; 0–20 partes por billón de H_2.*	5% de la teórica para O_2. 5% de la teórica para H_2.	Análisis de corrientes continuas. Tipo industrial.

* En los Estados Unidos de Norteamérica, 1 billón = mil millones. (N. del T.)

rriente. La mayoría de los sistemas de control utilizan sistemas neumáticos para la operación del tercer elemento.

Sistemas intermitentes

El control de sistemas intermitentes por lo general implica un control sencillo, el cual, en un sistema en el que no hay flujo, permitirá alcanzar una cierta condición deseada y continuará manteniendo esa condición hasta completar el proceso.

Un sistema intermitente puede ser ilustrado por un recipiente con camisa de vapor, lleno con un fluido que ha de calentarse. El controlador abre una válvula que admite vapor en la camisa, donde dicho vapor se condensa cediendo calor a las paredes del recipiente. El condensado es extraído en forma continua por medio de una trampa de vapor. Cuando el fluido interno llega a la temperatura deseada, ésta es mantenida por el controlador abriendo o cerrando la válvula de entrada de vapor.

Estos sistemas a menudo se usan en la industria de alimentos cuando un proceso de cocción debe continuar durante un tiempo prolongado. El operador llena el recipiente y pone el instrumento en operación. Mediante el uso de un dispositivo medidor de tiempo, se puede hacer que el sistema quede interrumpido al final de un cierto periodo.

Si la temperatura no es crítica, el mismo tipo de calentamiento puede ser logrado por un control de la presión en la camisa de vapor, el cual controle la cantidad de vapor en la camisa. La trampa extraerá continuamente el condensado y la camisa de vapor se mantendrá a la misma temperatura mientras la presión sea constante.

En un recipiente agitado la localización del elemento primario es de relativa poca importancia, puesto que todo el fluido debe tener a final de cuentas la misma temperatura, en cuyo momento el control cerrará la válvula de vapor hasta que se registre una caída de temperatura.

En dicho tipo de procesos intermitentes se usan con mayor frecuencia los controles de temperatura de tipo de expansión de fluidos. El instrumento puede o no tener registro. El controlador puede estar separado del instrumento registrador, utilizando la expansión de un fluido para operar directamente la válvula de control.

Sistemas continuos

En el sistema intermitente recién descrito rara vez hay necesidad de un control estrecho puesto que, una vez que el recipiente alcanza su temperatura deseada, la admisión de tan sólo una pequeña cantidad de calor debe mantener su contenido en el punto deseado. El control del proceso indudablemente sería un asunto sencillo si la mayoría de los procesos fueran similares al recipiente de operación

intermitente. Sin embargo, los problemas de control en las plantas de proceso por lo general implican procesos continuos en los cuales se deben tener en cuenta la temperatura, la presión y el flujo.

En general, los problemas de control de flujo y presión son relativamente sencillos, ya que sólo requieren el ajuste de válvulas para disminuir o aumentar flujo o presión. La capacidad del equipo y el aumento de flujo o presión pueden ser calculados y las válvulas pueden ser dimensionadas en la forma correspondiente. Si la presión o el flujo son afectados por entrada de calor se origina un problema de control más complicado.

Aunque los cambios de presión o flujo pueden ser detectados de manera casi instantánea, los elementos primarios de los instrumentos de temperatura están generalmente sujetos a retrasos considerables. El retraso producido tanto por el elemento primario como por el instrumento puede ser de varios segundos. De esta forma, las temperaturas reales de los fluidos pueden cambiar antes de que el elemento indique cambio alguno. Si el ingeniero instrumentista tiene un conocimiento sólido del proceso puede estar capacitado para reducir al mínimo este retraso mediante una cuidadosa selección y aplicación de instrumentos.

Modos de control de proceso

Control manual

Los primeros procesos dependían casi completamente de control manual para su operación. Los dispositivos detectores consistían en un manómetro y en un termómetro de vidrio. El control se basaba en la experiencia, vista, sonido y memoria humanos.

Uno de los tipos más simples de control manual es la operación de la locomotora de vapor. La caldera se opera por medio de un manómetro (presión de vapor), de un tubo de vidrio para agua (nivel líquido) y de la habilidad del fogonero para palear el carbón o ajustar un quemador de aceite (control). La experiencia o inspección indican al fogonero cuándo se debe agregar carbón al hogar o agua a la caldera. Cuando se agrega demasiado combustible, la válvula de seguridad (alivio) deja escapar el exceso de presión de vapor. El consumo de potencia de la locomotora es errático debido a cambios en los declives. Por experiencia o memoria, el fogonero puede anticipar pendientes escarpadas y levantar presión para reducir la pérdida de potencia.

La experiencia, por supuesto, es el requerimiento primordial del control manual. Diversos procesos son operados manualmente por las siguientes razones: (*a*) no se fabrica instrumentación que satisfaga los requerimientos, (*b*) el costo de la instrumentación disponible es excesivo o (*c*) los costos de mano de obra por mantenimiento de instrumentación elaborada son altos. En general, existen relati-

vamente pocos procesos que no puedan ser automatizados de una manera completa. Un estudio para casi cualquier planta de proceso también mostrará que hay pocos procesos operados manualmente que no usen instrumentación para indicar y registrar.

Mediante el uso de equipo de control remoto, los procesos pueden ser arrancados, interrumpidos o ajustados manualmente desde una estación central de control. La válvula de control con diafragma operado neumáticamente con frecuencia se utiliza en este servicio para un control preciso del flujo y también se usan las válvulas de motor operadas por medios hidráulicos y eléctricos. Las operaciones manuales pueden ser simplificadas y reducida la mano de obra de operación, por medio de la utilización de control remoto desde un punto centralizado de control.

Control mecánico

El control mecánico se usa en las operaciones de plantas de proceso para operar los controles del regulador de tiro de los calentadores, para accionar ciertas válvulas, en dispositivos contadores y en mecanismos-límite para operaciones de manejo y empaque.

Control neumático

En control de proceso, los sistemas neumáticos son más extensamente utilizados que cualquier otro. Los cambios en la variable controlada son trasladados a una presión de aire específica la cual, a su vez, opera una válvula de control de diafragma (véase el Cap. 18). El diafragma mueve el vástago de la válvula, haciendo que la válvula abra o cierre. Un cambio de presión de sólo 5 lb/plg^2 en un diafragma de 12 plg de diámetro efectivo produce un cambio de fuerza de 565 lb. Variando el tamaño del diafragma se pueden obtener los requerimientos necesarios de potencia para aplicaciones particulares.

La válvula de control de diafragma requiere una fuente de aire y un método de aplicar presión al diafragma. Los cuatro medios fundamentales de lograr esta acción son el control de dos posiciones (conectar y desconectar), el control proporcional, el control proporcional con reajuste (*"reset"*) y el control proporcional con reajuste y acción anticipadora (*"reset-rate"*).

Control de dos posiciones

En la Fig. 20-14 se muestra un diafragma esquemático de una unidad de control neumático de dos posiciones. Es un mecanismo de control de conectar y desconectar. Hacia el orificio se proporciona continuamente aire de suministro. Cuando el elemento de medición se desvía del punto de control, una chapaleta que es actuada por el dispositivo detector cubre o descubre el orificio. Un aumento en

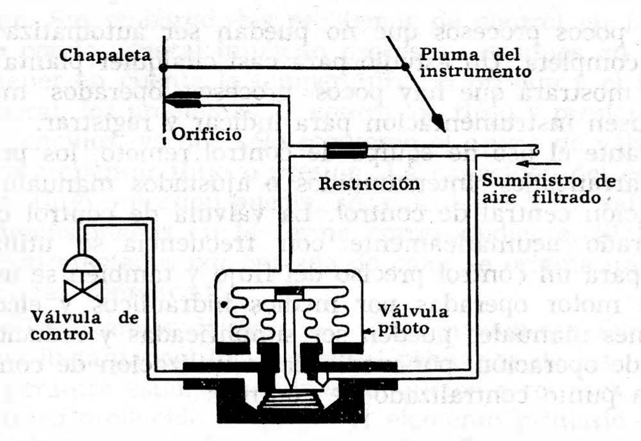


FIG. 20-14. Control neumático de dos posiciones. (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

la variable controlada, por ejemplo, hace que la chapaleta se mueva hacia el orificio y produzca un incremento de presión entre la restricción y el orificio. Esta presión es transmitida hacia una válvula piloto (relevador neumático) haciendo que ésta se abra, mandando toda la presión de aire sobre la válvula de control.

Las válvulas de control pueden ser ajustadas a modo que una falla en la presión de aire abra o cierre la válvula. Las precauciones de seguridad dictan el tipo de acción requerida cuando ocurre una falla. Debido a sus aberturas más grandes, la válvula piloto puede transmitir con muy poco retraso toda la presión de aire y, por esto, se prefiere esta válvula a una conexión directa entre el orificio y la válvula de control.

CONTROL PROPORCIONAL

Si en lugar de un control de dos posiciones se usa uno proporcional (Fig. 20-15) se puede obtener un control más uniforme que el cíclico de conectar y desconectar. Estas unidades están diseñadas a manera de poder variar, en toda la escala de la variable controlada, el porcentaje de cambio requerido para abrir o cerrar la válvula de control. Este porcentaje se llama "banda proporcional".

La acción de un controlador de banda proporcional es similar a la descrita para el controlador de dos posiciones, con excepción de que la presión de aire de la válvula de control es aplicada hacia un fuelle estrangulador cuyo movimiento contrarresta el movimiento original de la chapaleta. El movimiento neto final de la chapaleta está gobernado por la posición de la banda proporcional, la cual puede ser cambiada manualmente. Bandas anchas producen movimientos más pequeños de la chapaleta y, por consiguiente, menores cambios en la presión de la válvula de control para un movimiento

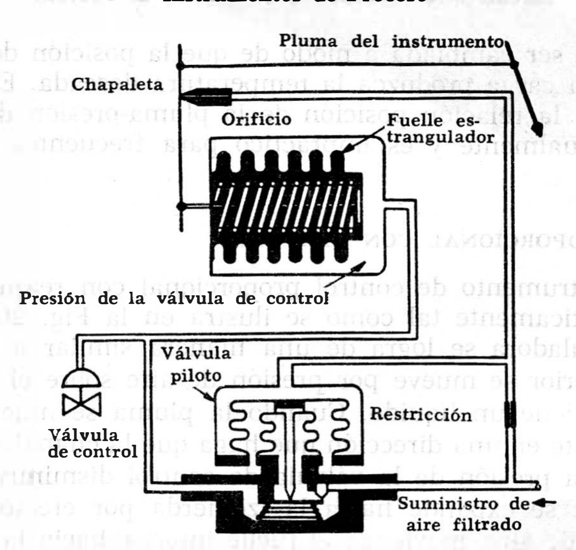


FIG. 20-15. Control neumático proporcional (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

dado de la pluma. Por lo tanto, el control proporcional produce, sobre la válvula de control, una acción estranguladora más que un movimiento de conectar y desconectar.

La presión de aire de la válvula de control es proporcional a la posición de la pluma, por lo que en esta forma existe una posición de la válvula de control para cada temperatura dentro del rango de condiciones de abrimiento y cerramiento. Para mantener la temperatura en el punto de control, se requieren una abertura de válvula y presión de aire definidos. Los cambios en temperatura hacen que la válvula abra o cierre, regresando así el sistema a su punto de control original. La acción estranguladora reduce al mínimo la acción cíclica.

Sin embargo, si la carga de proceso aumenta apreciablemente, por ejemplo, sobre un calentador de vapor, la abertura de la válvula de control de vapor que se requiere para mantener el sistema a la temperatura de control debe ser mayor (se requiere más vapor). Esto no puede ser corregido automáticamente por el controlador proporcional. Por consiguiente, ocurre un desplazamiento hacia una menor temperatura de equilibrio, en la cual la correspondiente posición de válvula es adecuada para mantener constante la temperatura del tanque. Esta desviación o compensación depende de la anchura de la banda proporcional (es mayor para bandas anchas) y de la magnitud del cambio de carga. Una posición de banda ancha produce la mínima acción cíclica, pero la mayor compensación con grandes cambios de carga. La banda angosta tiene el efecto opuesto.

Para regresar el instrumento a su punto de control, la relación entre la posición de la pluma y la posición de la válvula (presión

de aire) debe ser cambiada a modo de que la posición de la válvula para la nueva carga produzca la temperatura deseada. Este ajuste o reposición de la relación posición de la pluma-presión de aire debe hacerse manualmente y es impráctico para frecuentes cambios de carga.

CONTROL PROPORCIONAL CON REAJUSTE

En el instrumento de control proporcional con reajuste, éste se hace automáticamente tal como se ilustra en la Fig. 20-16. La acción estranguladora se logra de una manera similar a la descrita. El fuelle interior se mueve por presión de aire sobre el fuelle exterior que contiene un líquido. Cuando la pluma se mueve desde el punto de ajuste en una dirección que haga que la chapaleta se aparte del orificio, la presión de la válvula de control disminuye. El fuelle estrangulador se expande hacia la izquierda por efecto de la más baja presión de aire, moviendo el fuelle interior hacia la izquierda y la chapaleta nuevamente hacia el orificio. La cámara líquida de los dos fuelles exteriores (izquierdo y derecho) está conectada por medio de un paso restringido. La cámara líquida de la derecha está siempre a la presión atmosférica. La de la izquierda está momentáneamente abajo de dicha presión. El líquido de la derecha, por consiguiente, pasa gradualmente hacia la izquierda haciendo que el

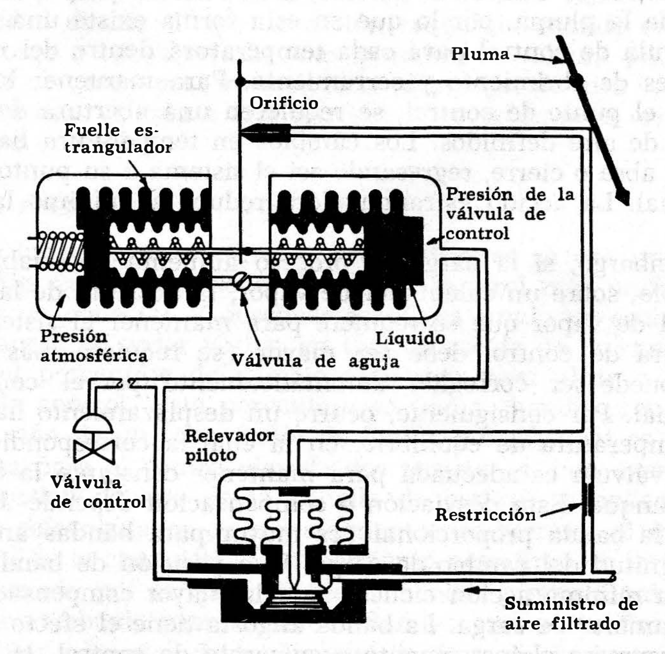


FIG. 20-16. Control neumático proporcional con reajuste. (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

fuelle interior se mueva otra vez hacia la derecha. Este movimiento aleja la chapaleta del orificio y abate más la presión del aire, y se repite el ciclo recién descrito.

El movimiento de la aguja separándose de la chapaleta continuará de esta manera hasta que la válvula de control llegue al punto en el que la pluma regrese a su punto de ajuste o control. Unicamente en este punto las presiones líquidas serán iguales en cada fuelle. Por consiguiente, esta acción de reajuste mantendrá el proceso en el punto de control, con independencia de fluctuaciones de carga.

Control proporcional con reajuste y acción anticipadora

La acción de anticipación se logra instalando una restricción ajustable entre la línea de presión de aire de la válvula de control y el fuelle estrangulador. Dicha restricción tiene el efecto de disminuir la acción estranguladora y permitir así a la válvula de control "sobrecorregir" temporalmente los cambios en la variable controlada. Esta acción produce una corrección más rápida durante la primera parte de un periodo de desajuste. Es particularmente valiosa para sistemas que tengan grandes retrasos entre cambios en el sistema y cambios en la variable medida. La acción de anticipación puede ser ajustada para adaptarse a las condiciones de proceso.

Ciertos instrumentos de control neumático pueden ser ajustados para estrangulación, reajuste y anticipación de respuesta con objeto de adaptarlos a los procesos más complejos. Por supuesto, cada adición a la complejidad de un instrumento aumenta su precio. Todo lo que se debe requerir es el instrumento menos costoso, de buena calidad, que realice apropiadamente su trabajo. Si un control de conectar y desconectar es satisfactorio para una corriente no crítica de proceso, sería antieconómico comprar un controlador, más costoso, de estrangulación, con reajuste y acción anticipadora.

Aire para instrumentos

Para una operación adecuada de los sistemas neumáticos, se debe suministrar un aire seco y limpio y por esta razón la tubería de distribución debe estar separada de los sistemas de aire de la planta. El sistema ideal debe tener, por separado, sus compresoras y receptores de aire y algún tipo de unidad regeneradora deshidratadora. Los sistemas de distribución de la planta para el aire de instrumentos debe ser operado a presiones sobre 45 a 50 lb/plg² de modo que los cabezales de distribución no sean mayores de 3 o 4 plg de tamaño nominal. Una presión usual es del orden de 75 a 85 lb/plg². La presión del aire para instrumentos dentro de una área de proceso no necesita ser mayor de 35 a 40 lb/plg².

Como una precaución contra la humedad, debe habilitarse una pierna de goteo justamente antes del reductor de presión o de la válvula de bloqueo del área. Es una práctica estándar el colocar en cada instrumento una válvula reductora por separado, con filtro y purga, para mantener constante la presión de suministro de aire.

Casi todos los problemas de mantenimiento diferentes al desgaste mecánico pueden ser eliminados si el suministro de aire es limpio y está libre de humedad. La tubería de distribución debe ser galvanizada y la tubería de transmisión de aire a los instrumentos debe ser de cobre o de aluminio, de diámetro pequeño, generalmente de ⅜ plg (9.6 mm) de diámetro exterior, como máximo. Las conexiones pueden ser de latón o de bronce, de tipo de campana. Diversos fabricantes están produciendo actualmente múltiples conjuntos de tuberías, encerrados en conductores de acero, de tipo de coraza flexible. Estos conjuntos ahorran mucho tiempo en instalación y protegen, asimismo, durante la construcción, a los tubos más pequeños. Para tubería de instrumentos también se usan diversos materiales plásticos y algunos operadores de plantas prefieren estos materiales al cobre o al aluminio.

El instrumento de control de tipo neumático es quizá, entre todos los tipos de instrumentos, el más resistente al trato inadecuado. El desarrollo de dicho instrumento ha cubierto varias décadas y prácticamente todos los fabricantes conocidos ofrecen instrumentos comparables, si se toma como base la confiabilidad, la simplicidad, la adaptabilidad y la operación. La industria de instrumentos, por supuesto, de ningún modo se ha estancado. Constantemente se están ofreciendo nuevos desarrollos y el ingeniero instrumentista debe tratar de mantenerse al tanto de su industria en vez de suponer que sólo ciertos fabricantes son capaces de satisfacer aplicaciones particulares.

Control hidráulico

Los controles operados hidráulicamente han sido muy ampliamente usados en algunas industrias. Su uso para control de proceso, sin embargo, está limitado a operaciones que requieran una potencia considerable y control del tipo de dos posiciones. La aplicación de la hidráulica, como un medio de control independiente, se extendió tremendamente durante la Segunda Guerra Mundial. Los llamados "servosistemas" que se usan extensamente en controles de aviones, utilizan sistemas hidráulicos para tener una acción positiva e instantánea.

Los componentes de estos sistemas son una cámara para almacenamiento del fluido hidráulico, una bomba de engranes o de otro tipo de desplazamiento positivo, válvulas de control y la unidad de potencia que, por lo general, es un pistón y un cilindro. Comúnmente, cada aplicación de control hidráulico tiene todos estos compo-

nentes. Sería posible tener un sistema centralizado de potencia hidráulica en el cual el fluido fuera distribuido a cada usuario, de manera similar a los sistemas neumáticos. No obstante, se puede apreciar que en cada caso se requerirían dos juegos de tuberías: uno para dar servicio de presión al usuario y el otro para el sistema de retorno a la unidad central. Con el sistema neumático, únicamente se requiere un solo suministro o conexión entre el instrumento y la unidad de potencia. Además, los sistemas hidráulicos generalmente operan a mayores presiones que los neumáticos y, por consiguiente, requieren tuberías más pesadas. Si bien en control de proceso existen varios usos para los sistemas hidráulicos, las características que se acaban de enumerar por lo general indican la selección de controles neumáticos. Indudablemente, a medida que sea mayor la aplicación de los servosistemas, el uso de las unidades hidráulicas también aumentará.

Control eléctrico y electrónico

Controladores eléctricos

El movimiento de instrumentos de presión, potenciómetros y otros instrumentos similares, puede ser utilizado para operar interruptores o contactos de mercurio colocados arriba y abajo del punto de control. La señal eléctrica puede entonces abrir o cerrar una válvula operada eléctricamente (tal como una válvula de solenoide) o accionar, en el punto de control, una válvula reversible operada con motor.

Algunos instrumentos de control proporcional y de control proporcional con reajuste tienen dispositivos eléctricos y electrónicos para accionar una válvula operada eléctricamente. Estas técnicas han sido descritas.[6,9] El potenciómetro se adapta mejor a este tipo de control. El movimiento de la pluma es seguido por contacto con una resistencia deslizante que forma un circuito de puente con una resistencia similar que está en contacto con el viaje de la válvula motorizada. Relevadores adecuados detectan el desbalanceo que en el circuito de puente origina el movimiento de la pluma desde el punto de control. El movimiento de la válvula motorizada se inicia entonces en la dirección apropiada, de tal modo que balancea el circuito de puente.

Válvulas operadas eléctricamente

Se fabrican varios tipos de válvulas operadas eléctricamente. La llamada válvula de solenoide es quizá, la más ampliamente utilizada entre las válvulas accionadas por motor. La válvula de solenoide es una unidad de dos posiciones que opera ya sea abierta o cerrada.

Con frecuencia, la válvula de solenoide se usa junto con sistemas neumáticos, admitiendo o interrumpiendo la presión de aire

hacia las unidades de potencia. Las válvulas de solenoide son muy útiles en aplicaciones de seguridad. Si diversos sistemas neumáticos se alimentan a través de un suministro común de aire, en el sistema se puede instalar una válvula de solenoide, de dos pasos, de modo que una falla en la planta eléctrica cause la "desenergización" y la abertura de la válvula, dejando escapar aire del sistema. Todas las válvulas de control del sistema adoptarán entonces una posición de emergencia.

El sistema aire-motor en una válvula que trabaja con aire puede ser reemplazado por un motor eléctrico reversible que opere a través de una reducción de engranes para accionar la válvula de acuerdo con la señal recibida. Varios modelos están disponibles.

Señales indicadoras

Los sistemas eléctricos se usan extensamente para indicar, por medio de señales, condiciones remotas de proceso o la posición de operación de equipo de proceso mediante luces de color en el centro de control. Los instrumentos de niveles de líquidos con frecuencia están provistos de interruptores de contacto que indican por dichos medios el nivel del líquido de proceso. Determinado equipo crítico accionado eléctricamente puede estar provisto con indicadores de conectar y desconectar.

Para muchos de los propósitos anteriores se usa el tablero anunciador, uno de los primeros desarrollos de los sistemas a base de señales eléctricas de bajo voltaje. Tiene las características favorables de pequeño tamaño, voltaje bajo y centralización, mientras que las luces de señales, más convencionales, consumen mucho más espacio y mano de obra de instalación. Por lo general, cada tablero anunciador se instala como una unidad por separado.

El sistema de señales de tablero anunciador frecuentemente se usa en plantas que tienen sistemas eléctricos implicados. Los puntos de falla se conectan al tablero y, de esta manera, las fallas se localizan con toda rapidez.

Desarrollos electrónicos

Dondequiera que un movimiento mecánico tenga potencia suficiente para operar un microinterruptor o cualquier otro tipo de interruptor eléctrico, innumerables variaciones de aplicaciones de control eléctrico son posibles. La mayoría de los usos de sistemas eléctricos para control de procesos tiene lugar en servicios de conectar y desconectar, aunque la gran variedad de posibles usos de la electrónica está sólo comenzando a ser aplicada a control de procesos. A medida que el desarrollo avance, indudablemente dichos métodos de control encontrarán un uso mayor.

Control del sistema

El empleo de principios de electrónica en instrumentación de plantas de proceso, en la actualidad se limita principalmente a la conversión y amplificación de impulsos detectores primarios, aunque el control del sistema por medio de la electrónica tiene horizontes ilimitados.

El control de un sistema, en contraste con el control de un punto, permitirá controlar todo el proceso. El control por anticipación, por lo general, debe dejarse a cambios manuales puesto que los instrumentos actualmente disponibles no pueden funcionar sino hasta que ocurre algún cambio en el elemento primario. La única excepción a esto la constituye el instrumento que trabaja junto con otro controlador. En cierto sentido, esto puede ser considerado como un control por anticipación; sin embargo, se encontrará que el número de variables que pueden controlarse de esta manera es muy limitado.

Para tener un control de sistema, todas las variables consideradas tendrían que ser detectadas colectivamente, su relación evaluada por un instrumento común y sus cambios efectuados de acuerdo con un patrón, ya fuera predeterminado o determinado por instrumentos. Es sólo en los últimos años que dicho sistema ha resultado practicable.

Las computadoras electrónicas tendrán un papel principal en estos desarrollos. Este "control de computadora", no obstante, requiere un conocimiento cuantitativo y una expresión del mismo, de modo que pueda ser usado por la máquina. Es sorprendente, pero cierto, que el conocimiento cuantitativo únicamente se ha desarrollado para un pequeño número de procesos sencillos. El criterio de ingeniería requerido en la operación de tantas plantas no puede, hasta la fecha, ser reducido a una expresión matemática.

Control neumático vs. electrónico

Boyd[2] describió la primera refinería completa que se controló con instrumentos electrónicos. El también comparó el control neumático con el control electrónico. Las señales de fem de termopares, por ejemplo, en lugar de ser convertidas en señales neumáticas y transmitidas por tuberías a una válvula distante, pueden transmitirse como señal eléctrica a la válvula, después de una amplificación electrónica apropiada. Este arreglo proporciona una sensibilidad mucho mayor. La eliminación de tubería de aire para instrumentos no solamente simplifica las instalaciones, sino elimina las dificultades causadas por la humedad que durante épocas de frío se congela en las líneas de aire

La instalación descrita requiere conversión de la señal eléctrica a presión de aire en la válvula, puesto que en la actualidad las válvulas de control accionadas por motor no son tan rápidas como las válvulas neumáticas, y los engranes sufren un desgaste excesivo en la posición que corresponde al punto de control. Boyd[2] sugiere el desarrollo de una válvula operada hidráulicamente con bombas individuales y motores accionados por la señal eléctrica. De esta manera, se podrían usar las características de respuesta favorable del controlador electrónico.

Teoría del control

Para describir los numerosos tipos de sistemas de control se han desarrollado excelentes teorías. Algunas veces, el ingeniero de proyecto en discusiones con ingenieros instrumentistas sobre problemas de control difícil, puede encontrar de utilidad el conocimiento limitado de estas teorías. En las referencias se anota una lista de diversos trabajos sobre teoría del control, los cuales son de recomendarse para ingenieros con experiencia en ingeniería química o en ingeniería mecánica.

Centros de control

La transmisión neumática y electrónica permite la centralización de todos los instrumentos. Unidades de proceso de muchos millones de dólares, las cuales generan grandes cantidades de productos de alta calidad, pueden ahora ser operadas por unos cuantos hombres experimentados que rara vez necesitan moverse de los confortables alrededores de un moderno cuarto de control con aire acondicionado. El departamento de control se ha convertido no solamente en el centro nervioso de la unidad de proceso, sino también en el lugar de exhibición. Se da bastante atención a la comodidad, así como al aspecto del interior y del exterior del departamento de control y al tablero mismo. Los fabricantes de instrumentos han respondido a esta tendencia y están proporcionando formas y estilos de instrumentos que producen no sólo un control preciso, sino también un atractivo tablero de control. En la Fig. 20-17 se muestran tableros típicos de control.

El tamaño y arreglo de los tableros de control han cambiado considerablemente con el advenimiento de los tableros gráficos (véase la Fig. 20-17). El tablero gráfico proporciona un diagrama simplificado de flujo del proceso. Su utilidad, empero, es de mayor beneficio a los operadores de proceso novatos que a los experimentados, ya que éstos deben aprender a conocer todas las fases del proceso con independencia de los arreglos en los tableros de control. El cambio más importante originado por los tableros gráficos ha sido la reducción en el tamaño de los instrumentos, lo cual ha permitido

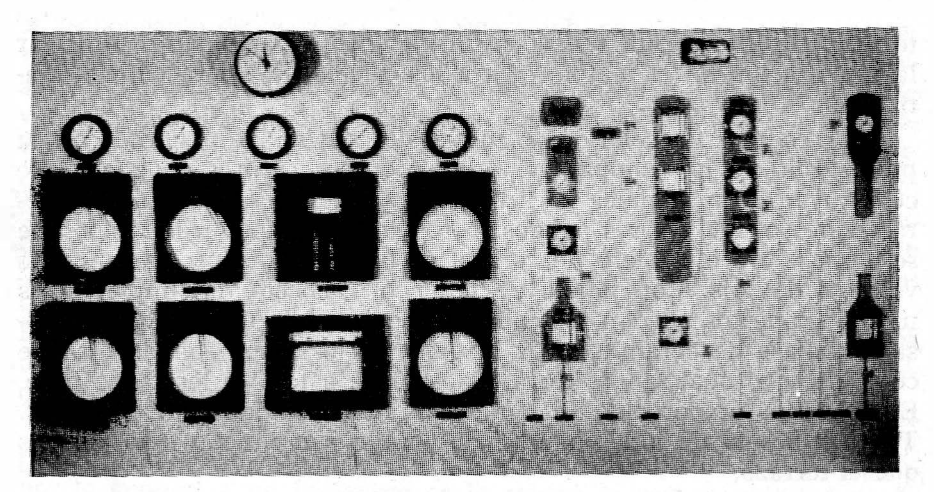


FIG. 20-17. Tableros de control. Izquierda: tablero convencional; derecha: tablero gráfico. (Cortesía de Minneapolis-Honeywell Regulator Company.)

reducciones subsecuentes en la longitud del tablero de control y, de esta manera, en las dimensiones de los cuartos de control. La tendencia a tamaños menores se hace también evidente en instrumentos no destinados para ser dispuestos en tableros gráficos.

Al instalar el centro de control para la planta de proceso, detrás del tablero se debe dejar un espacio adecuado para el mantenimiento de los instrumentos. Se recomienda un mínimo de seis pies (1.8 m) entre el muro del edificio y los instrumentos.

Si el proceso es peligroso o está sujeto a riesgo de incendio, en el lado oculto del tablero se deben instalar grandes aberturas para ventanas. En el lado cercano a la unidad de proceso se deben habilitar pequeñas ventanas. Todos los vidrios de ventanas deben ser inastillables o protegidos con telas metálicas. En el cuarto de control deben existir, al menos, tres puertas de acceso o de salida. El material de las puertas debe ser del tipo "antipánico" o tener dispositivos que las mantengan abiertas hacia el exterior. De ordinario, las puertas de los cuartos de control no deben tener seguros. En este criterio también deben quedar incluidas las puertas de salida del área de atrás del tablero.

Los cuartos de control deben tener iluminación direccional o empotrada. Si se considera que el cuarto de control va a estar dentro de una área peligrosa, se deben usar accesorios de iluminación fluorescente, a prueba de explosión. Por lo general, es suficiente, una intensidad de 50 bujías-pie o ligeramente mayor. La misma intensidad debe propiciarse detrás del tablero, para mantenimiento. Con un falso plafón ligeramente más alto que la parte superior del tablero de control, se puede obtener un aspecto agradable en el cuar-

to de control. De esta forma se dispone de espacio para empotrar la iluminación en el plafón y para los ductos de calefacción y ventilación.

Los códigos de color y los materiales varían de acuerdo con la preferencia de las compañías. A menudo los centros de control se construyen de materiales no inflamables, acústicos, los cuales generalmente son de colores pálidos, pero pueden pintarse del color que se desee. Para el tablero de control se han usado diversos tonos de verde o de gris. Con objeto de tener un aspecto de limpieza, los muros expuestos pueden ser cubiertos con azulejo u otro tipo de mosaico a base de cerámica. Por lo general, los pisos son de losa de concreto, con acabado de terrazo, loseta de asfalto o loseta de hule. Esta última proporciona la superficie más cómoda para caminar. Tanto la loseta de hule como la de asfalto son mucho más baratas que el terrazo.

En el edificio de control es práctica común que haya una oficina para el jefe u operador en turno, así como servicios sanitarios, una despensa equipada con refrigerador eléctrico, un fregadero y una parrilla en donde los operadores puedan calentar sus alimentos (a los operadores de turno por lo general no se les permite salir de su unidad). También es usual disponer de un bebedero de agua enfriada automáticamente. Algunas veces se incluye un cuarto de vestidores con servicio de regaderas, de modo que los operadores se puedan cambiar de ropa en su unidad de proceso.

Se están popularizando los cuartos de control con aire acondicionado durante verano e invierno, particularmente en los climas más calurosos. Si se instala aire acondicionado, en el mismo sistema se incluye calefacción. La ventilación puede lograrse a través de ductos o con ventiladores colocados en los muros del edificio. Los ductos no aumentan mucho el costo y eliminan el ruido de los ventiladores. Para algunos procesos el cuarto de control se mantiene bajo una presión positiva. El aire fresco se succiona a través de una toma elevada para que los humos nocivos que pueda haber cerca del nivel del piso no puedan penetrar al cuarto.

En general, el costo del cuarto de control representa una parte muy pequeña del costo del equipo de proceso. Los cuartos de control atractivos sostienen alta la moral del personal que en ellos labora. El ligero costo adicional que se emplea para tener un espacio de trabajo limpio y agradable es indudablemente un dinero bien gastado.

INGENIERIA DE INSTRUMENTACION

Los desarrollos de instrumentación están continuando a un ritmo desenfrenado. Compañías de operación y fabricantes progresivos de instrumentos mantienen divisiones de investigación dedicadas al desarrollo de nuevas técnicas y el ingeniero instrumentista, que es

el responsable de la selección y operación apropiada de los instrumentos en una planta de proceso, debe estar al tanto de estos desarrollos modernos asistiendo a reuniones técnicas y leyendo las revistas especializadas. Por otra parte, las discusiones sobre el desarrollo de nuevos instrumentos con los representantes del fabricante son necesarias y convenientes.

Un proyecto de diseño y construcción de una planta de proceso necesita los servicios de un grupo, capacitado y bien informado, de ingenieros instrumentistas. Actualmente, los ingenieros instrumentistas tienen diversos antecedentes, tales como ingeniería química, física, ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica y química. En todos los casos se tiene un interés común en equipo electrónico y en maquinaria de precisión.

La organización de un grupo de ingeniería de instrumentos para proyectos de diseño de plantas varía en cada compañía. Sin embargo, por lo general a un ingeniero se le asigna la responsabilidad de la instrumentación de una parte de la planta o de toda ella. Este ingeniero comienza cuanto antes su trabajo durante el desarrollo del diseño de la planta. En esta etapa, el ingeniero de proceso solicitará la asesoría del ingeniero instrumentista en fases del diseño que serían grandemente influidas por la selección de los instrumentos. A menudo el diseño de un reactor químico, por ejemplo, puede simplificarse bastante por una aplicación inteligente de instrumentos de control.

Cuando el diseño del proceso está completo y el diagrama de ingeniería de flujo se está desarrollando, se debe determinar toda la instrumentación, incluyendo los instrumentos indicadores. Esto se logra de una manera más adecuada comenzando primeramente con diversos intercambios técnicos de impresiones entre el ingeniero instrumentista, el ingeniero de proyecto y el ingeniero de proceso. Los ingenieros de proyecto y de proceso deben describir el proceso, explicar el criterio del cliente sobre instrumentación e indicar el presupuesto.

Los conocimientos sobre instrumentación son muy útiles a los ingenieros de proceso y de proyecto en dichas discusiones. Con la información obtenida de dichas charlas y con las subsecuentes discusiones sobre los puntos críticos de control, el ingeniero instrumentista queda capacitado para determinar todas las variables de cada unidad de proceso y para decidir cuáles deben ser controladas, medidas o indicadas. Basado en su conocimiento de la instrumentación mejor y más reciente, puede determinar todos los instrumentos requeridos para la unidad de proceso.

Todos estos instrumentos se muestran entonces esquemáticamente mediante símbolos en el diagrama de ingeniería de flujo (véase la Tabla 5-3). A cada instrumento se le asigna un número,

el cual se usa para identificación durante el diseño, la compra y la construcción. Luego se seleccionan los instrumentos sobre la base de ofertas competitivas por parte de los fabricantes.

Los planos de instrumentos de los fabricantes se usan durante la erección, al igual que un número limitado de planos de instalación hechos por el departamento de instrumentos. Estos planos por lo general incluyen esquemas típicos de instalación para medidores de orificio, conjuntos de termopares y otros. Dichos planos pueden ser empleados para varios tipos diferentes de trabajos. De aquí que el dibujo de instrumentos no sea una tarea muy laboriosa en la mayoría de los proyectos. También deben hacerse los planos de distribución del tablero de control, puesto que éstos se diseñan para cada obra utilizando tableros estándar que se disponen para adaptarse a las condiciones particulares.

En los planos de tuberías se localizan accesorios tales como placas de orificio, pero generalmente se requieren pocas instrucciones detalladas en forma de planos. La instalación de instrumentos debe ser hecha por operarios de bastante experiencia, supervisados por un ingeniero instrumentista. Las decisiones sobre diversos detalles pueden ser tomadas de manera más económica, durante la construcción, por el ingeniero instrumentista responsable. De esta manera se evita una cantidad considerable de costoso tiempo de dibujo.

Para realizar, con éxito y de manera económica, la instrumentación de una planta de proceso se requiere cooperación entre los ingenieros de proceso, de proyecto y de instrumentos. También se necesita una mutua comprensión de los otros campos de la ingeniería, de modo que las discusiones puedan trascender más allá del alcance de las generalidades y puedan lograrse decisiones concretas. El ingeniero de proyecto puede mantenerse al tanto de los nuevos desarrollos sobre instrumentos, leyendo los informes breves elaborados con tal propósito en las revistas de química e ingeniería química. El enterarse de informes más detallados en revistas especializadas sobre instrumentación es por lo general una labor más pesada, máxime teniendo en cuenta que el ingeniero de proyecto debe también leer la literatura del día sobre procesos, desarrollos teóricos de ingeniería química y equipo de proceso.

REFERENCIAS

1. Behar, M. F., "Handbook of Measurement and Control", Part II of *Instruments and Automation,* 27, Núm. 12 (1954).
2. Boyd, D. M., *Oil and Gas Journal,* 53, Núm. 27, 139 (1954).
3. Brown, G. S. y D. P. Campbell, *Principles of Servomechanisms,* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
4. Dike, Paul H., *Thermoelectric Thermometry,* Leeds and Northrup Co., Philadelphia, Pa., 1954.

5. Eckman, Donald P., *Industrial Instrumentation*, John Wiley & Sons. Inc., New York, 1950.
6. Eckman, Donald P., *Principles of Industrial Process Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1945.
7. Farrington, G. H., *Fundamentals of Automatic Control*, Chapman and Hall, London, 1951.
8. *Fluid Meters, Their Theory and Application*, 4a. Ed., Am. Soc. Mech. Engrs., New York, 1937.
9. *Fundamentals of Instrumentation for the Process Industries*, Minneapolis-Honeywell Regulator Co., Industrial Division, Philadelphia, Pa.
10. Lajoy, M. H., *Industrial Automatic Controls*, Prentice-Hall, Inc., New York, 1954.
11. Sprenkle, R. E., *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs.*, 67, 345 (1945).

CAPITULO 21

SERVICIOS PARA LA PLANTA

A una planta de proceso los servicios le son tan indispensables como a una ciudad y, en la planeación de una planta, forman una parte tan importante como el diseño de las unidades de proceso.

Poniendo un énfasis especial sobre los aspectos de diseño, se discutirán los siguientes servicios:

Servicios primarios

(*a*) Agua
(*b*) Combustible
(*c*) Vapor de fuerza y de proceso
(*d*) Almacenamiento y movimiento de materias primas y productos

Servicios secundarios

(*a*) Servicios de mantenimiento
(*b*) Edificios de la planta (diferentes a los de proceso; véase el Cap. 23)
(*c*) Calzadas de la planta
(*d*) Servicios de vías férreas
(*e*) Protección contra incendios (véase el Cap. 24)
(*f*) Sistemas de drenajes y de eliminación de desechos de la planta
(*g*) Aire para la planta
(*h*) Seguridad en la planta

TABLA 21-1. IMPUREZAS COMUNES ENCONTRADAS EN EL AGUA*

Constituyente	Fórmula química	Dificultades causadas	Medios de tratamiento
Turbiedad	Ninguna; en los análisis se expresa como SiO_2	Imparte una apariencia desagradable al agua. Origina depósitos en las líneas de agua, equipo de proceso, calderas, etc. Interfiere con la mayoría de los usos de proceso.	Coagulación, asentamiento y filtración.
Color	Ninguna; en los análisis se expresa como "unidades" de color en alguna escala arbitraría	Puede causar formación de espuma en calderas. Interfiere con métodos de precipitación, tales como los de separación de hierro y ablandamiento en caliente con fosfato. Al usarse en proceso, puede manchar el producto.	Coagulación y filtración. Cloración. Adsorción por medio de carbón activado.
Dureza	Sales de calcio y magnesio expresadas como $CaCO_3$	Fuente principal de incrustaciones en equipo de intercambio de calor. calderas, tuberías, etc. Forma coágulos con el jabón, interfiere en el teñido, etc.	Ablandamiento. Destilación. Tratamiento interno de agua de calderas. Agentes tensoactivos.
Alcalinidad	Bicarbonatos (HCO_3), carbonatos (CO_3) e hidratos (OH), expresados como $CaCO_3$	Formación de espuma y acarreo de sólidos con vapor. Fragilización del acero de calderas. Con vapor de agua, los bicarbonatos y los carbonatos producen CO_2, un compuesto que produce corrosión.	Ablandamiento a la cal y cal-carbonato. Tratamiento ácido. Ablandamiento con zeolitas de hidrógeno. Desmineralización. Desalcalinización por intercambio aniónico. Destilación.
Acidos minerales libres	H_2SO_4, HCl, etc., expresados como $CaCO_3$	Corrosión.	Neutralización con álcalis.
Bióxido de carbono	CO_2	Corrosión en líneas de agua y especialmente en líneas de vapor y condensado.	Aeración. Desaeración. Neutralización con álcalis. Aminas neutralizadoras y formadoras de película.
*p*H	Concentración de iones hidrógeno definida como: $pH = \log \frac{1}{(H^+)}$	El *p*H varía de acuerdo con la naturaleza, ácida o alcalina, de los sólidos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un *p*H de 6 a 8.	El *p*H puede ser incrementado por los álcalis y disminuido por los ácidos.
Sulfato	$(SO_4)^-$	Se suma al contenido de sólidos del agua pero, por sí mismo, este ion generalmente no es significativo. Se combina con el calcio para formar incrustación de sulfato de calcio.	Desmineralización. Destilación.
Cloruro	Cl^-	Se suma al contenido de sólidos del agua e incrementa las caracteristicas corrosivas de ella.	Desmineralización. Destilación.
Nitrato	$(NO_3)^-$	Se suma al contenido de sólidos del agua pero, por lo general, no es significativo industrialmente. Altas concentraciones causan methemoglobinemia en los niños. De utilidad para el control de la fragilización metálica en calderas.	Desmineralización. Destilación.
Fluoruro	F^-	Mancha el esmalte de los dientes. También se usa para el control de las caries dentales. Por lo general no es industrialmente significativo.	Adsorción con hidróxido de magnesio. fosfato de calcio o negro de humo. Coagulación con alumbre.

Sílice	SiO_2	Incrustación en calderas y sistemas de enfriamiento de agua. Depósitos insolubles en los álabes de las turbinas, debidos a vaporización de la sílice.	Eliminación por proceso en caliente con sales de magnesio. Adsorción por resinas de intercambio aniónico, fuertemente básicas, junto con desmineralización. Destilación.
Hierro	Fe^{++} (ferroso) Fe^{+++} (Férrico)	Al precipitar mancha el agua. Origen de depósitos en líneas de agua, calderas, etc. Interfiere con teñido, curtido, fabricación de papel, etc.	Aeración. Coagulación y filtración. Ablandamiento con cal. Intercambio catiónico. Filtración por contacto. Agentes tensoactivos para retención de hierro.
Manganeso	Mn^{++}	Las mismas que el hierro.	Los mismos que el hierro.
Aceite	Se expresa como aceite o material extraíble en éter.	Incrustaciones, lodos y formación de espuma en calderas. Retarda el intercambio de calor. Indeseable en la mayoría de los procesos.	Separadores de mamparas. Coladores. Coagulación y filtración. Filtración con tierra de diatomáceas.
Oxígeno	O_2	Corrosión de líneas de agua. equipo de intercambio de calor, calderas, líneas de retorno, etc.	Desaeración. Sulfito de sodio. Inhibidores de corrosión.
Acido sulfhídrico	H_2S	Causa olor a "huevos podridos". Corrosión.	Aeración. Cloración. Intercambio aniónico fuertemente básico.
Amoniaco	NH_3	Corrosión de aleaciones de cobre y zinc, por formación de ion complejo soluble.	Intercambio catiónico con zeolitas de hidrógeno. Cloración. Desaeración.
Conductividad	Se expresa en micromhos de conductancia específica.	La conductividad es el resultado de sólidos ionizables en solución. Una alta conductividad puede aumentar las características corrosivas de una agua.	Cualquier proceso que disminuye el contenido de sólidos disueltos disminuye la conductividad. Ejemplos de ello son la desmineralización y el ablandamiento con cal.
Sólidos disueltos	Ninguna	Los "sólidos disueltos" son una medida de la cantidad total de materia disuelta y se determinan por evaporación. Una concentración elevada de sólidos disueltos es objetable por interferencias de proceso y como causa de formación de espuma en calderas.	Diversos procesos de ablandamiento, tales como con cal e intercambio catiónico con zeolitas de hidrógeno, reducen los sólidos disueltos. Desmineralización. Destilación.
Sólidos en suspensión	Ninguna	Los "sólidos en suspensión" son una medida del material sín disolver y se determinan gravimétricamente. Los sólidos suspendidos obturan las líneas, causan depósitos en equipo de intercambio de calor, calderas, etc.	Sedimentación. Filtración, generalmente precedida por coagulación y asentamiento.
Sólidos totales	Ninguna	Los "sólidos totales" son la suma de los sólidos disueltos y en suspensión determinada gravimétricamente.	Véase "Sólidos disueltos" y "Sólidos en suspensión".

* Reimpreso con autorización, *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*, 4th. Ed., Betz. W. H. and L. O. Betz, Chem. Eng. (1953).

SERVICIOS PRIMARIOS

Los servicios que son vitales para la operación de una planta se llaman servicios primarios.

Agua

Con independencia de su origen, el agua natural nunca es pura. A medida que la lluvia cae, disuelve en ella gases y polvo de la atmósfera. Conforme penetra en la tierra, el agua absorbe bióxido de carbono, tanto de la atmósfera como de las capas superiores del suelo. La solución resultante de bióxido de carbono en agua es un ácido moderado y al fluir sobre suelos y rocas disuelve cantidades significativas de minerales.

El agua superficial, como la de ríos y lagos, mantiene arcillas y arena en suspensión, aunque el agua subterránea es clara debido a que los estratos del subsuelo actúan como filtros. El agua subterránea, a diferencia del agua superficial, tiene un alto contenido de minerales.

Tanto los suministros subterráneos de aguas como los superficiales pueden llegar a contaminarse y pueden contener microorganismos (bacterias patogénicas) causantes de enfermedades, los cuales deben ser destruidos antes que dichos suministros se usen para fines potables.

En la Tabla 21-1 se presenta una lista de las impurezas comunes en el agua natural, los métodos de separación y los efectos insalubres causados por estas impurezas. Las aguas que tienen un alto contenido de minerales se llaman "duras" y las aguas cuyo contenido mineral es bajo, "suaves".

El aumento en consumo de jabón originado por una agua "dura" es bien conocido, pero la mayor dificultad en las plantas de proceso es causada por la tendencia de estas aguas a formar incrustaciones. Cuando el agua se calienta, las sales de calcio se depositan como incrustación, produciéndose una disminución en las capacidades de transmisión de los cambiadores de calor y de los sistemas de enfriamiento. Al evaporarse el agua en el equipo generador de vapor, tanto las sales de calcio como las de magnesio se depositan en forma de incrustación.* Estos depósitos no sólo reducen la transmisión de calor, sino que también restringen el flujo de fluidos y si no se remueven acabarán por obturar el lado por donde circula el agua en un cambiador de calor.

La eliminación de los iones calcio y magnesio del agua se llama ablandamiento. Los procesos de ablandamiento en uso común son el cal-carbonato, el fosfato y el de intercambio de iones. En la Tabla 21-2 se comparan tales procesos.

* Cuando se calienta, el $Ca(HCO_3)_2$ se descompone a $CaCO_3$. La solubilidad del $CaCO_3$ y del $CaSO_4$ disminuye al aumentar la temperatura.

Tipos de agua que se emplean en las plantas de proceso

El grado requerido de pureza del agua depende del uso particular. Si el agua cruda es impura, como normalmente acontece, convendrá tener varios sistemas separados de agua para que no sea necesario purificar toda el agua que entra a la planta. El tratamiento de toda el agua cruda que entra a la planta puede incluir colado y sedimentación para separar sólidos suspendidos, pero el tratamiento subsecuente dependerá del uso final de cada sistema de agua. El suministro típico de agua para una planta podría ser dividido en sistemas de agua de proceso, alimentación de calderas, enfriamiento, para usos sanitarios, contra incendio y para servicios varios.

Agua de proceso

Algunos procesos usan el agua como uno de los compuestos reaccionantes o como solvente y, para evitar la contaminación de productos o el envenenamiento de catalizadores, con frecuencia se necesita una agua altamente purificada. Para dichos propósitos, el agua ablandada por el proceso cal-carbonato puede ser desmineralizada ulteriormente por intercambio iónico o por evaporación. El condensado no contaminado de vapor es otra excelente fuente de agua pura para uso en proceso.

Agua de alimentación de calderas

Las calderas modernas de alta presión requieren agua altamente purificada. El agua tratada de manera ordinaria por el proceso cal-carbonato se purifica adicionalmente por intercambio iónico o por tratamiento en caliente con fosfatos para producir agua de alimentación de calderas. Un tratamiento ulterior, necesario para asegurar una operación satisfactoria de las calderas y del sistema de distribución de vapor, puede incluir:

(*a*) Tratamiento ácido o tratamiento por agentes orgánicos tensoactivos para evitar depósitos de carbonato de calcio y de fosfato de calcio en las líneas de alimentación de las calderas.
(*b*) Eliminación de sílice para prevenir la formación de incrustaciones de silicato de calcio y de magnesio: la sílice es eliminada por las sales de magnesio que se agregan durante el tratamiento cal-carbonato, en caliente.
(*c*) Eliminación de aceite para evitar depósitos carbonosos y formación de espuma.
(*d*) Desaeración para eliminar gases corrosivos.

Además del tratamiento inicial como agua de alimentación, el agua de calderas puede ser separada continuamente del sistema para volverse a tratar. El *p*H se reajusta y el agua se vuelve a tratar

TABLA 21-2. COMPARACION DE PROCESOS DE ABLANDAMIENTO DE AGUA

Proceso	Método	Reacciones
1. Cal-carbonato	Los iones calcio y magnesio son precipitados con cal y carbonato, como $CaCO_3$ y $Mg(OH)_2$, los cuales se separan luego por sedimentación.	1. $Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = 2CaCO_3 + 2H_2O$ 2. $Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + 2CaCO_3$ 3. $MgSO_4 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + CaSO_4$ 4. $MgCl_2 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2 + CaCl_2$ 5. $CaSO_4 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + Na_2SO_4$ 6. $CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3 + 2NaCl$
2. Proceso en caliente con fosfato	Los iones calcio y magnesio son precipitados con iones fosfato e hidroxilo, como $Ca_3(PO_4)_2$ y $Mg(OH)_2$. El $Ca_3(PO_4)_2$ es más insoluble que el $CaCO_3$.	1. $3Ca(HCO_3)_2 + 6NaOH = 3CaCO_3 + 3Na_2CO_3 + 6H_2O$ 2. $3CaCO_3 + 2Na_3PO_4 = Ca_3(PO_4)_2 + 3Na_2CO_3$ 3. $Mg(HCO_3)_2 + 4NaOH = Mg(OH)_2 + 2Na_2CO_3 + 2H_2O$
3. Ablandamiento con zeolitas	Los iones objetables son separados por sustitución con otros iones en el lecho de zeolitas.	1. $Ca^{++} + Na_2Ze^{*} = CaZe + 2Na^{++}$ (zeolita de sodio) 2. $Ca(HCO_3)_2 + H_2Ze = CaZe + 2H_2CO_3$ (zeolita de hidrógeno) (intercambio iónico) (Los ácidos producidos son neutralizados por adición de álcali, agua cruda o agua tratada con zeolita de sodio).

* *Ze* = Zeolita.

TABLA 21-2. COMPARACION DE PROCESOS DE ABLANDAMIENTO DE AGUA (*Continuación*)

Proceso	Ventajas	Desventajas	Observaciones
1. Cal-carbonato	(*a*) Es el mejor para aguas de alta dureza. (*b*) Al mismo tiempo separa el hierro. (*c*) Separa sólidos en suspensión, por oclusión en la masa coagulada.	(*a*) No reduce la dureza tanto como el proceso de zeolitas. (*b*) Control mucho más difícil que en el caso de las zeolitas. (*c*) En muchas aguas no disminuyen los sólidos disueltos. (*d*) Se requieren coagulantes para lograr la sedimentación más eficiente.	El ablandamiento por el proceso cal-carbonato en frío se usa de ordinario en sistemas municipales. El agua se trata a su temperatura de bombeo. El ablandamiento por el proceso en caliente se usa para tratamiento de agua de calderas. Antes del tratamiento, el agua se calienta con vapor. La temperatura más elevada (212°F, 100°C), aumenta la reacción y la sedimentación, permitiendo el uso de equipo más pequeño.
2. Proceso en caliente, con fosfato	(*a*) La mayor insolubilidad del $Ca_3(PO_4)_2$ permite la producción de agua con dureza "cero". (*b*) Es el mejor para aguas de dureza baja.	(*a*) Más difícil de controlar que el proceso de zeolitas. (*b*) El agua ablandada puede producir depósitos si el *p*H no está apropiadamente ajustado.	Es el mejor para tratamiento de agua de calderas. Si el agua es muy dura, la primera etapa puede ser un proceso cal-carbonato.
3. Ablandamiento con zeolitas.	(*a*) Fácil de operar y controlar. (*b*) Produce aguas de dureza baja. (*c*) Existen, disponibles, resinas de intercambio aniónico que en combinación con resinas catiónicas pueden producir agua desmineralizada comparable al agua destilada. (*d*) Las resinas de intercambio catiónico producen agua de alcalinidad baja. (*e*) Las resinas catiónicas pueden tratar agua muy alcalina.	(*a*) El agua turbia debe ser filtrada. (*b*) El agua tratada, a menudo es corrosiva. (*c*) Puede ser más caro que otros métodos. Se debe estudiar cada caso. (*d*) Las aguas muy alcalinas o muy ácidas no deben ser usadas con las zeolitas de sodio.	Se dispone de muchas resinas nuevas; para seleccionar el método apropiado de tratamiento, competentes ingenieros químicos y especialistas en la materia deben realizar estudios de costos. Las zeolitas de sodio son regeneradas periódicamente por medio de salmuera de NaCl; las zeolitas de hidrógeno, por medio de ácido.

en un ablandador por proceso en caliente. Esta agua se retorna entonces a la caldera junto con el condensado y el agua de repuesto.

AGUA DE ENFRIAMIENTO

En una planta de proceso, la mayor cantidad de agua es usada por los condensadores enfriados con agua y por los enfriadores.

Una agua de enfriamiento que provenga de una gran fuente inagotable puede ser empleada una sola vez y descartada. El agua, sin embargo, es un servicio escaso y es preferible recircularla a través de una torre de enfriamiento y retornarla a los usuarios. En estos sistemas de circulación el agua se suministra de 80 a 90°F (27 a 32°C) y se retorna a la torre de enfriamiento a un máximo de 120°F* (49°C).

Aun en sistemas de paso único, es necesario cierto tratamiento del agua de enfriamiento para evitar precipitación de incrustaciones, corrosión y formación de babazas y algas. Por supuesto, el grado de tratamiento debe ser mayor para sistemas de recirculación, ya que las impurezas se concentran a medida que ocurren pérdidas por evaporación.

En todos los sistemas de agua de enfriamiento el carbonato de calcio causa la mayor parte de las incrustaciones, aunque en sistemas de recirculación las concentraciones de sulfato de calcio y de silicatos de calcio y magnesio pueden ser también lo suficientemente elevadas para producir incrustaciones.

El método más barato para prevenir la formación de incrustaciones es la adición al agua de pequeñas cantidades de agentes tensoactivos. Estos, en realidad, aumentan la solubilidad de las sales en el agua evitando la precipitación aun cuando las sales estén sobresaturadas. Para prevenir la corrosión debida al oxígeno disuelto, se pueden agregar inhibidores de corrosión tales como cromatos o fosfatos tensoactivos. Generalmente, estos métodos son adecuados para sistemas de paso único de enfriamiento de agua.

En sistemas de enfriamiento de agua con recirculación, el aumento en la concentración de sales es inevitable conforme el agua se evapora en la torre de enfriamiento. La cantidad de agua de repuesto requerida para reemplazar éstas y otras pérdidas es pequeña (4%, incluyendo fugas y pérdidas por el viento). Por consiguiente, el agua de calderas a menudo no se diluye lo suficiente para evitar la formación de incrustaciones, aun cuando se usen agentes tensoactivos. Cuando éste es el caso, una parte del agua puede ser separada para un ablandamiento ulterior o para un tratamiento con ácido sulfúrico, el cual convierte el carbonato de calcio en sulfato de calcio, más soluble. Esta agua tratada se retorna entonces al sistema.

---

* Temperaturas más elevadas causan una rápida corrosión de las tuberías y de diferentes partes de los cambiadores de calor.

Muchos operadores han encontrado ventajoso usar cal-carbonato o zeolitas para sistemas de enfriamiento de agua con recirculación. El agua tratada es la carga inicial del sistema de enfriamiento de agua y también se trata toda el agua de repuesto. Se inyectan inhibidores de corrosión, la concentración de los cuales se comprueba diariamente.

Para sistemas de enfriamiento de agua de camisas de máquinas se debe usar agua desmineralizada o condensado. El agua de la camisa es enfriada por medio de intercambiadores enfriados con aire o con agua y es recirculada a la máquina. En sistemas cerrados se usan inhibidores de corrosión, tales como cromatos.

El equipo de bombeo de agua a la torre de enfriamiento debe ser diseñado con un factor de seguridad de 10 a 15% en su capacidad. El cabezal de la bomba debe ser suficiente para circular el agua a través del equipo y retornarla a las entradas de la torre de enfriamiento, las cuales están generalmente de 30 a 40 pies (9 a 12 m) sobre el nivel de la bomba. En cualquier tipo de sistema de circulación cerrada, la caída de presión de la tubería debe ser cuidadosamente verificada en toda la tubería.

Se emplean bombas centrífugas impulsadas con motor eléctrico o con turbina. Siempre suelen instalarse otras fuentes de fuerza y/o equipo de repuesto para bombeo en virtud de que el agua de enfriamiento es esencial aun durante las paradas de emergencia de la planta.

El agua de mar se ha usado con éxito como agua de enfriamiento, especialmente en áreas costaneras en las que escasea el agua fresca. Sistemas de protección catódica, que emplean ánodos de magnesio colocados en el cabezal flotante y en el canal de los cambiadores de calor, evitan una corrosión excesiva. Los depósitos se reducen al mínimo restringiendo el aumento en la temperatura del agua de enfriamiento, por abajo del punto en donde las sales de calcio comienzan a precipitar. Los depósitos que se acumulan pueden ser separados mediante tratamientos con ácido inhibido.

Agua para usos sanitarios

El agua para usos sanitarios debe ser potable y estar libre de bacterias patógenas. Generalmente en las áreas metropolitanas se compra agua municipal para este propósito. En localidades remotas o en poblaciones pequeñas, una parte del agua tratada de la planta suavizadora puede ser destinada para usos sanitarios. El agua tratada debe clorarse para destruir las bacterias y después se bombea a un sistema independiente.

Pruebas bacteriológicas periódicas establecen el cloro residual que debe quedar, después de diez minutos, en el agua tratada para asegurar la destrucción de bacterias. Después de esto, por medio de una sencilla prueba se verifica todos los días el cloro residual.

Los sistemas de agua para uso sanitario son operados a presiones manométricas de 20 a 30 lb/plg² (1.4 a 2.1 kg/cm²) ya que presiones mayores perjudican los accesorios estándares de plomería. Para asegurar un suministro ininterrumpido de agua, generalmente se instala un tanque elevado de almacenamiento.

AGUA CONTRA INCENDIO

Los requerimientos de agua contra incendio son intermitentes y puede suponerse que para tener suficiente capacidad de este tipo de agua otros servicios podrán ser interrumpidos, de ser necesario. Como recipiente de capacidad relativamente grande de agua contra incendio puede usarse una pileta de torre de enfriamiento, pero el almacenamiento más común para agua de emergencia es el tanque elevado.

Para elevar la presión manométrica del agua a 150 lb/plg² (10.5 kg/cm²), a manera de tener de 100 a 125 lb/plg² (7 a 8.7 kg/cm²) en los pitones de las mangueras contra incendio, se usan bombas centrífugas especiales para este uso, aprobadas por las compañías aseguradoras. Se instalan dos bombas con una capacidad mínima de 1 000 gal/min (3 785 lt/min). Cada una tiene diferente fuente de potencia; por ejemplo, una de motor eléctrico y la otra de motor de gasolina. Si se requiere una altura de succión la bomba debe ser autocebante.

Los cabezales del agua contra incendio no deben ser empleados para otros propósitos. Se deben tomar las precauciones necesarias para interconectar de emergencia el sistema de agua contra incendio en el recipiente más grande de agua. Por lo general, éste es el suministro de agua cruda ya que el agua contra incendio no requiere tratamiento alguno. Las plantas ubicadas a lo largo de las áreas costaneras con frecuencia usan el agua de mar o el agua salobre como agua contra incendio.

AGUA PARA SERVICIOS VARIOS

Este tipo de agua se utiliza para diversas operaciones de lavado, tales como las de limpieza de una determinada área de proceso. Esta agua debe estar libre de sedimentos, pero no requiere ningún tratamiento. Se deben colocar avisos que prohiban al personal beber esta agua.

Combustible

En las plantas de proceso los combustibles se usan para calentadores, reactores y evaporadores calentados a fuego directo, hornos, generadores de vapor, turbinas de gas y máquinas de combustión interna. Los combustibles que por lo común se usan son: líquidos

derivados del petróleo, gas natural, combustibles sólidos, como la hulla y el coque, y productos de desecho.

Gas natural

El gas natural es el combustible ideal para las plantas de proceso. No requiere más servicios de manejo o almacenamiento que tuberías y controles de presión. Las flamas de gas son limpias y se propagan con rapidez, produciendo un quemado satisfactorio con flujos bastante bajos de combustible.

Las refinerías de petróleo y las plantas petroquímicas disponen de grandes cantidades de gases naturales para usarse como combustible. El etano e hidrocarburos más pesados son separados del gas natural crudo o de los gases desprendidos en operaciones de descomposición térmica. El gas, además de usarse como combustible primario, por lo general se emplea para iniciar la combustión en hornos industriales que queman otros tipos de combustibles. Las espreas de combustibles líquidos se encienden con pilotos que queman gas, y las cámaras de combustión para carbón pulverizado se calientan hasta la temperatura de ignición por medio de quemadores de gas.

Combustibles líquidos derivados del petróleo

En el mercado existe una amplia variedad de aceites combustibles para uso industrial. La Oficina de Estándares de los Estados Unidos* y otras organizaciones gubernamentales han publicado estándares para muchos de los tipos comunes de combustibles líquidos. En la Tabla 21-3 se presentan las propiedades de algunos aceites combustibles típicos.

Debido a su elevada viscosidad, los combustibles industriales pesados se entregan en carros-tanque calentados con vapor. El combustible se almacena en tanques calentados y en las grandes instalaciones se circula continuamente entre el almacenamiento calentado y el horno. Mediante este procedimiento el combustible se conserva a la temperatura correcta para ser quemado y se mantiene una presión constante en los quemadores, de modo que el control del encendido sea bastante sencillo. Los hornos instalados aisladamente pueden tener unidades combinadas de bombeo y calentamiento localizadas cerca del punto de uso.

Los combustibles más ligeros, tales como la querosina y el diesel, se usan para las máquinas de combustión interna. Las motores de combustión interna rara vez se emplean en las plantas de proceso, excepto para ciertos servicios auxiliares, pero los motores diesel se usan extensamente. El almacenamiento de combustible para motores de combustión interna es sencilla, dado que los combustibles utili-

---

* *U. S. Bureau of Standards*, en el original. (N. del T.)

Los sistemas de agua para uso sanitario son operados a presiones manométricas de 20 a 30 lb/plg² (1.4 a 2.1 kg/cm²) ya que presiones mayores perjudican los accesorios estándares de plomería. Para asegurar un suministro ininterrumpido de agua, generalmente se instala un tanque elevado de almacenamiento.

AGUA CONTRA INCENDIO

Los requerimientos de agua contra incendio son intermitentes y puede suponerse que para tener suficiente capacidad de este tipo de agua otros servicios podrán ser interrumpidos, de ser necesario. Como recipiente de capacidad relativamente grande de agua contra incendio puede usarse una pileta de torre de enfriamiento, pero el almacenamiento más común para agua de emergencia es el tanque elevado.

Para elevar la presión manométrica del agua a 150 lb/plg² (10.5 kg/cm²), a manera de tener de 100 a 125 lb/plg² (7 a 8.7 kg/cm²) en los pitones de las mangueras contra incendio, se usan bombas centrífugas especiales para este uso, aprobadas por las compañías aseguradoras. Se instalan dos bombas con una capacidad mínima de 1 000 gal/min (3 785 lt/min). Cada una tiene diferente fuente de potencia; por ejemplo, una de motor eléctrico y la otra de motor de gasolina. Si se requiere una altura de succión la bomba debe ser autocebante.

Los cabezales del agua contra incendio no deben ser empleados para otros propósitos. Se deben tomar las precauciones necesarias para interconectar de emergencia el sistema de agua contra incendio en el recipiente más grande de agua. Por lo general, éste es el suministro de agua cruda ya que el agua contra incendio no requiere tratamiento alguno. Las plantas ubicadas a lo largo de las áreas costaneras con frecuencia usan el agua de mar o el agua salobre como agua contra incendio.

AGUA PARA SERVICIOS VARIOS

Este tipo de agua se utiliza para diversas operaciones de lavado, tales como las de limpieza de una determinada área de proceso. Esta agua debe estar libre de sedimentos, pero no requiere ningún tratamiento. Se deben colocar avisos que prohiban al personal beber esta agua.

Combustible

En las plantas de proceso los combustibles se usan para calentadores, reactores y evaporadores calentados a fuego directo, hornos, generadores de vapor, turbinas de gas y máquinas de combustión interna. Los combustibles que por lo común se usan son: líquidos

derivados del petróleo, gas natural, combustibles sólidos, como la hulla y el coque, y productos de desecho.

Gas natural

El gas natural es el combustible ideal para las plantas de proceso. No requiere más servicios de manejo o almacenamiento que tuberías y controles de presión. Las flamas de gas son limpias y se propagan con rapidez, produciendo un quemado satisfactorio con flujos bastante bajos de combustible.

Las refinerías de petróleo y las plantas petroquímicas disponen de grandes cantidades de gases naturales para usarse como combustible. El etano e hidrocarburos más pesados son separados del gas natural crudo o de los gases desprendidos en operaciones de descomposición térmica. El gas, además de usarse como combustible primario, por lo general se emplea para iniciar la combustión en hornos industriales que queman otros tipos de combustibles. Las espreas de combustibles líquidos se encienden con pilotos que queman gas, y las cámaras de combustión para carbón pulverizado se calientan hasta la temperatura de ignición por medio de quemadores de gas.

Combustibles líquidos derivados del petróleo

En el mercado existe una amplia variedad de aceites combustibles para uso industrial. La Oficina de Estándares de los Estados Unidos* y otras organizaciones gubernamentales han publicado estándares para muchos de los tipos comunes de combustibles líquidos. En la Tabla 21-3 se presentan las propiedades de algunos aceites combustibles típicos.

Debido a su elevada viscosidad, los combustibles industriales pesados se entregan en carros-tanque calentados con vapor. El combustible se almacena en tanques calentados y en las grandes instalaciones se circula continuamente entre el almacenamiento calentado y el horno. Mediante este procedimiento el combustible se conserva a la temperatura correcta para ser quemado y se mantiene una presión constante en los quemadores, de modo que el control del encendido sea bastante sencillo. Los hornos instalados aisladamente pueden tener unidades combinadas de bombeo y calentamiento localizadas cerca del punto de uso.

Los combustibles más ligeros, tales como la querosina y el diesel, se usan para las máquinas de combustión interna. Las motores de combustión interna rara vez se emplean en las plantas de proceso, excepto para ciertos servicios auxiliares, pero los motores diesel se usan extensamente. El almacenamiento de combustible para motores de combustión interna es sencilla, dado que los combustibles utili-

---
* *U. S. Bureau of Standards*, en el original. (N. del T.)

TABLA 21-3. ESPECIFICACIONES DETALLADAS PARA ACEITES COMBUSTIBLES[a]

Tipo de aceite combustible[b]		Punto de inflamación, °F	Punto de congelación, °F	Agua y sedimentos, %	Carbono residual en un residuo de 10% %	Cenizas, %	Temperaturas de destilación, °F			Viscosidad								Gravedad °API
										Saybolt				Centistokes cinemáticos a				
Núm.	Descripción						En el punto de 10%	En el punto de 90%	Punto final	Universal a 100° F		Furol a 122° F		100° F		122° F		
		mín	máx	máx	máx	mín	máx	mín	máx	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	mín
1	Aceite destilado, destinado para quemadores vaporizadores tipo marmita y otros quemadores que requieren este tipo de combustible.[c]	100 o el legal	0	huellas	0.15	—	420	—	625	—	—	—	—	2.2	1.4	—	—	35
2	Aceite destilado para aplicaciones generales de calentamiento doméstico; para usarse en quemadores que no requieran el No. 1.	100 o el legal	[d] 20	0.10	0.35	—	[e]	675	—	40	—	—	—	(4.3)	—	—	—	26
4	Aceite para instalaciones de quemadores no equipadas con servicios de precalentamiento.	130 o el legal	20	0.50	—	0.10	—	—	—	125	45	—	—	(26.4)	(5.8)	—	—	—
5	Aceite tipo residual para instalaciones de quemadores equipadas con servicios de precalentamiento.	130 o el legal	—	1.00	—	0.10	—	—	—	—	150	40	—	—	(32.1)	(81)	—	—
6	Aceite para usarse en quemadores equipados con precalentadores, por lo que permiten un combustible de alta viscosidad.	150 o el legal	—	[f] 2.00	—	—	—	—	—	—	—	300	45	—	—	(638)	(92)	—

[a] Reconociéndose la necesidad de combustibles con bajo contenido de azufre para usarse en relación con tratamientos térmicos, metales no ferrosos, hornos para vidrio y cerámica y otros usos especiales, se puede establecer una especificación para azufre, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tipo de aceite combustible	Azufre, máx porcentaje
Núm. 1	0.5
Núm. 2	1.0
Núms. 4, 5 y 6	Sin límite

Otros límites para el contenido de azufre, únicamente pueden ser especificados por mutuo acuerdo entre el comprador y el vendedor.

[b] Con estas clasificaciones no se pretende que al no satisfacerse una especificación cualquiera de un tipo dado de combustible automáticamente se coloque dicho combustible en el tipo inmediato más bajo, a menos que de hecho satisfaga todas las especificaciones del tipo más bajo.

[c] El aceite No. 1 debe ser probado por lo que se refiere a corrosión, de acuerdo con el párrafo 15, durante 3 horas a 122°F. La tira expuesta de cobre no debe mostrar depósitos grises o negros.

[d] Se pueden especificar puntos de congelación más altos o más bajos, siempre que las condiciones de uso o de almacenamiento lo requieran. Sin embargo, estas especificaciones no requerirán un punto de congelación menor de 0°F bajo cualesquiera condiciones.

[e] El punto de 10% puede ser especificado a 440°F. Es el máximo para uso en quemadores que no atomizan.

[f] La cantidad de agua por destilación más el sedimento por extracción, no deben exceder de 2.00%. La cantidad de sedimento por extracción no debe exceder de 0.50%. Por toda el agua y sedimento que excedan de 1.0%, debe hacerse una deducción en cantidad.

Reimpreso de *Fuel Oils*, Commercial Standard CS12-48, U. S. Dept. of Commerce.

zados no requieren más calentamiento que el que tienen en el propio motor. Frecuentemente, un tanque con cabezal gravitacional se localiza cerca del motor y se llena intermitentemente desde otros servicios mayores de almacenamiento.

En áreas sujetas a interrupciones en el suministro de gas natural se usa, de manera bastante extensa, el gas de hidrocarburos licuados a presión.

Productos de desecho

Los subproductos de plantas de proceso que sean susceptibles de ser quemados pueden ser valiosos como combustibles. Sin embargo, en algunos casos resultan más costosos que los combustibles convencionales. Si, por ejemplo, el material de desecho es un líquido altamente viscoso, se requerirán sistemas especiales de bombeo. En otros casos, el subproducto puede contener agua y materiales corrosivos. Por último, pueden necesitarse importantes alteraciones al propio sistema del quemador para suministrar la relación correcta aire-combustible que propicie la combustión apropiada del material de desecho. De requerirse tales cambios, puede ser más barato desperdiciar el subproducto en un quemador de desechos o en una hoguera.

Si determinadas cantidades de productos de desecho quedan disponibles periódicamente, es mejor utilizarlas mezclándolas con el combustible regular, de modo que el combustible que va al horno sea de calidad constante.

Los desechos o subproductos combustibles más comunes son los gases de hornos de descomposición térmica, el desecho de la caña de azúcar (bagazo) y los desperdicios de la madera. Se han hecho varias aplicaciones interesantes de productos de desecho como combustibles. Una refinería, por ejemplo, utiliza los productos de combustión de un regenerador de una unidad catalítica de descomposición térmica. Estos gases son ricos en monóxido de carbono y se queman en un horno especial.

Hulla y coque

La hulla y el coque fueron los combustibles estándares para las primeras industrias, pero a medida que el aceite combustible y el gas natural tuvieron precios más baratos y se construyeron oleoductos y gasoductos, el uso de estos combustibles sólidos ha declinado.

El empleo de hulla o lignito continúa siendo ventajoso en plantas ubicadas cerca de grandes depósitos. Es de esperarse que el consumo de carbón aumente conforme los depósitos de gas y de petróleo se vayan agotando.

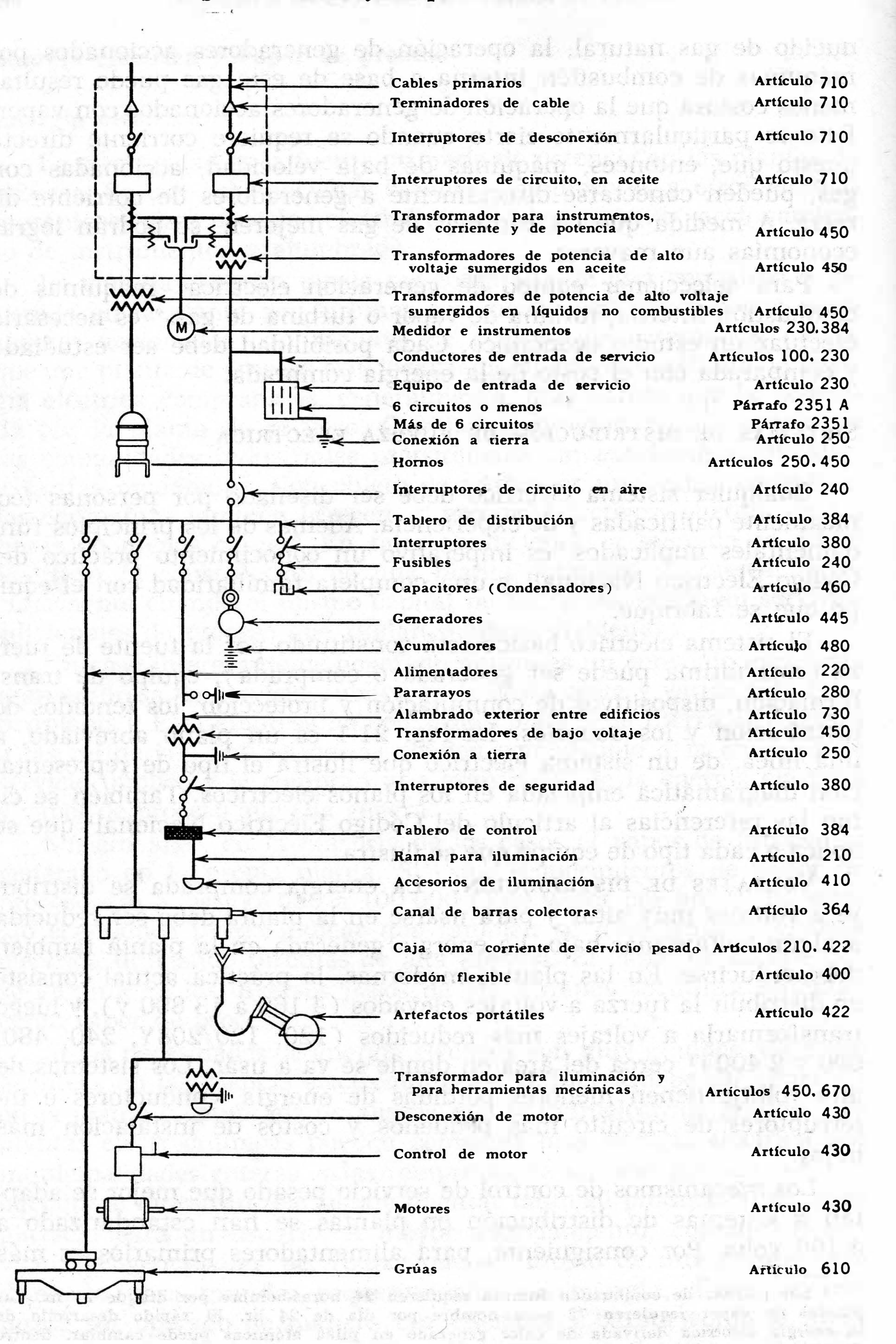


Fig. 21-1. Esquema de sistema eléctrico con referencias al Código Eléctrico Nacional, de 1953. (Cortesía de Square-D-Company.)

económico seleccionar 4 160 v que 2 400 v. Los sistemas que tienen capacidades hasta de 20 000 kva[9] pueden usar 4 160 v. Por encima de esta capacidad se emplean 13 800 v.

Independientemente de los niveles de voltaje, todos los sistemas de distribución deben tener un neutro a tierra con objeto de lograr una opración segura y facilidad de mantenimiento.

VOLTAJES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO. El voltaje de operación recomendado por los fabricantes de motores y demás equipo eléctrico aparece en la placa o en las instrucciones de operación de dicho equipo. Las especificaciones indicadas son ligeramente inferiores a los voltajes nominales de distribución, debido a las pérdidas en las líneas.

En la Tabla 16-2 del Cap. 16 se presentan las especificaciones típicas de motores. Los voltajes típicos para lámparas son 120 para las incandescentes y 118, 208, 236 y 265† para las fluorescentes.

MEDIOS DE CONDUCCIÓN. A través de la planta, la fuerza puede ser distribuida por medio de (*a*) alambrado descubierto sujeto a polos o estructuras, (*b*) cables por el interior de tuberías metálicas aparentes, (*c*) cables por el interior de tuberías metálicas, o de otro tipo, ocultas bajo el piso, (*d*) cables enterrados directamente en el suelo. En las plantas modernas se evitan los métodos (*a*) y (*d*), en virtud de que son inseguros y durante las operaciones de mantenimiento significan un constante riesgo. El método (*b*) se usa para cables que van por el interior de edificios y estructuras.

El cable que corre bajo el piso lo hace por el interior de tuberías de acero galvanizado de pared delgada o de tubos de asbesto-cemento. El tubo se recibe en una envoltura de concreto rojo (pigmento rojo que se agrega durante la mezcla) para poder asegurar una rápida identificación de la tubería durante cualesquiera excavaciones futuras.

Las tuberías de conducción eléctrica deben correr más abajo del nivel de penetración de las heladas y lo suficientemente separadas a manera de permitir la disipación del calor. A intervalos regulares se colocan registros [200 pies (61 m) como máximo para tramos rectos y 100 pies (30 m) para tramos con vueltasl a modo de poder jalar cómodamente el cable por el interior de la tubería. Mientras más corto sea el tramo entre registros, más sencilla se vuelve la operación de jalar el cable.

En las tuberías de conducción eléctrica las vueltas deben ser de radio largo y entre registros no debe permitirse más de una curva de 90°.

REGISTROS. Los registros deben ser lo bastante grandes para permitir que dos hombres con las herramientas necesarias hagan las conexiones y jalen el cable. Están construidos de concreto refor-

† Este voltaje corresponde a la línea a neutro en sistemas de 480 v. Cuando se especifican lámparas de este voltaje, no se necesita un sistema de iluminación por separado.

zado y son de forma rectangular o poligonal, con tapas de losa de concreto prevaciada en hierro fundido. El fondo del registro puede ser de suelo o de concreto, pero si el nivel de aguas freáticas está cerca de la superficie dicho suelo debe ser a prueba de agua.

En los lados de concreto del registro se fijan escaleras de barrotes para tener acceso al mismo, y al lado opuesto de la entrada de las tuberías se colocan unos dispositivos para jalar los cables. También se debe disponer de rastrillos portacables.

PROTECCIÓN DEL SISTEMA. Los circuitos y equipo de planta deben ser protegidos por dispositivos que abran los circuitos, para que la corriente no fluya en condiciones de sobrecarga o de falla. Los alimentadores de fuerza o servicios de alto voltaje que entran a una planta se protegen por medio de mecanismos de distribución operados manual o eléctricamente y de interruptores desconectadores (separadores) (véase la Fig. 21-1). Mediante transformadores se obtienen voltajes reducidos que alimentan circuitos de plantas, cada uno de los cuales tiene su interruptor de desconexión (separador) y su disyuntor individuales.

El interruptor de desconexión se usa para abrir un circuito, de modo que éste pueda aislarse por completo en caso de reparaciones. No son interruptores de operación diseñados para abrir o cerrar bajo carga.

Los disyuntores de circuito están diseñados para abrir un circuito cuando se sobrecarga por fallas en la operación o cortocircuitos. De esta manera todo el equipo en el circuito queda constantemente protegido.

EQUIPO ELÉCTRICO PARA ÁREAS PELIGROSAS. Cuando se localizan en áreas peligrosas, tanto el equipo eléctrico como los transformadores y los mecanismos de distribución deben ser a prueba de explosión. Sin embargo, tratándose de equipos, transformadores y mecanismos grandes, la localización de los mismos puede ser fuera de las áreas peligrosas o en el interior de carcasas especialmente ventiladas, a manera de poder evitar el gasto en construcciones a prueba de explosión.

Este equipo se diseña para soportar una explosión interna y prevenir la propagación de la flama por sus aberturas. Cualquier flama generada internamente debe viajar a través de restricciones que la hacen extinguirse. Todos los tipos de equipo eléctrico, incluyendo los teléfonos y los bebederos, pueden obtenerse en construcción a prueba de explosión. El equipo hermético al vapor, que sencillamente se sella para evitar la penetración de vapores, nunca debe usarse en las áreas peligrosas en lugar del equipo a prueba de explosión.

Energía a partir de vapor y vapor de proceso

El vapor es no únicamente una fuente de energía directa para la operación de bombas y turbinas, sino que también es el medio más útil de calentamiento en una planta de proceso. Aunque algunas plantas pueden comprar energía eléctrica, la mayoría de las plantas de proceso generalmente producen vapor.

Un departamento central de calderas puede proporcionar vapor para toda la planta, o cerca de las áreas de uso pueden instalarse calderas mas pequeñas (calderas-paquete). En plantas grandes puede resultar económico disponer de varios departamentos de calderas que reduzcan los costos de tuberías de distribución. Para determinar el tipo y número de calderas requeridas y el arreglo más ventajoso del sistema de distribución, se debe hacer un cuidadoso estudio económico.

En las etapas iniciales de la generación de vapor, se evapora agua que está en equilibrio, a la presión de generación, con el agua hirviente. Este vapor de agua se denomina vapor saturado y cualquier disminución de temperatura o aumento de presión hará comenzar la condensación. Para la mayoría de los usos, la humedad en el vapor no es deseable y es perjudicial a equipos tales como las turbinas, cuyos álabes son severamente erosionados por el vapor húmedo.

En la mayoría de las calderas de vapor, por consiguiente, el vapor saturado pasa por un cambiador de calor, llamado sobrecalentador, el cual se localiza en una área caliente del hogar de la caldera. El vapor se calienta por arriba de su temperatura de saturación por lo que estará lo suficientemente seco para proporcionar vapor libre de humedad a todos los usuarios.

Generadores de vapor

Un generador de vapor se compone de 2 partes principales: el hogar, que proporciona el calor, y la caldera, en la cual el calor se transmite al agua en circulación para formar vapor.

Hogar. El combustible se quema abajo o junto a la caldera y, por radiación y convección, el calor de combustión pasa a los colectores de vapor y a los tubos. El diseño del horno depende del combustible que se vaya a usar.

Los combustibles sólidos, tales como el carbón, se alimentan íntegramente al horno por medios mecánicos. Entre éstos se incluyen los siguientes:

(*a*) Alimentador de retorta: introduce el combustible debajo de la cama de combustión.

(*b*) Alimentador extendedor: distribuye el carbón encima de la cama de combustión.

(*c*) Parrilla viajera.

(*d*) Pulverizador: el carbón pulverizado se mezcla con aire y se distribuye en la zona de combustión en forma vertical, horizontal o tangencial.

(*e*) Ciclón: en una corriente de alta velocidad el carbón triturado sale tangencialmente del quemador y fluye en trayectoria espiral. Las partículas forman sobre la pared una escoria fundida que se quema rápidamente.

Las paredes de los grandes hornos de carbón generalmente están enfriadas con agua, para reducir al mínimo la indeseable formación de escoria y disminuir la radiación de las paredes.

Los combustibles líquidos deben ser atomizados para que las pequeñas gotas formadas se quemen lo más completamente posible. Utilizando atomización por medio de vapor o mecánica se pueden obtener varios tipos diferentes de quemadores. En el primer tipo, el vapor fluye por la tobera junto con el aceite, produciéndose la atomización. En el segundo tipo, la atomización se logra forzando el aceite a alta presión a través de una tobera de esprea.

Los quemadores de gas operan de 2 a 25 lb/plg^2 de presión manométrica y existen varios estilos de ellos. Por lo general están diseñados para trabajar con distinto tipo de combustible (carbón pulverizado o aceite).

En los hornos que queman gas o aceite también se instalan paredes enfriadas con aire o con agua. En este tipo de hornos, para evitar el contacto directo de la flama con los refractarios, los quemadores se localizan varios pies arriba del hogar.

TIPOS DE CALDERAS. Las calderas constan de superficies a través de las cuales se transmite el calor y están diseñadas para circulación y separación de agua y vapor. Generalmente se clasifican en calderas de tubos de humo y calderas de tubos de agua.

Calderas de tubos de humo. En las calderas de tubos de humo (Fig. 21-2), la circulación del agua, la formación del vapor y la separación tienen lugar en un gran tambor horizontal de 3 a 7 pies (92 a 214 cm) de diámetro, situado arriba del piso del horno a modo de recibir tanto el calor radiante como el de convección. Los gases calientes pasan sobre el tambor y después a través de diversos tubos de 2 a 4 plg (51 a 102 mm) de diámetro que se extienden a lo largo del tambor. El agua de alimentación se mantiene por arriba de la hilera superior de tubos.

Las calderas de tubos de humo tienen un bajo costo inicial y debido a la gran capacidad del tambor operan bien bajo las cargas fluctuantes que son comunes en las plantas de proceso. No obstante, están limitadas a bajas capacidades de producción de vapor [1 000 a 15 000 lb/hr (454 a 6 800 kg/hr)] y a bajas presiones manométricas [15 a 250 lb/plg^2 (1.05 a 17.7 kg/cm^2)].

Calderas de tubos de agua. En las calderas de tubos de agua, el agua y el vapor fluyen por el interior de los tubos y los gases

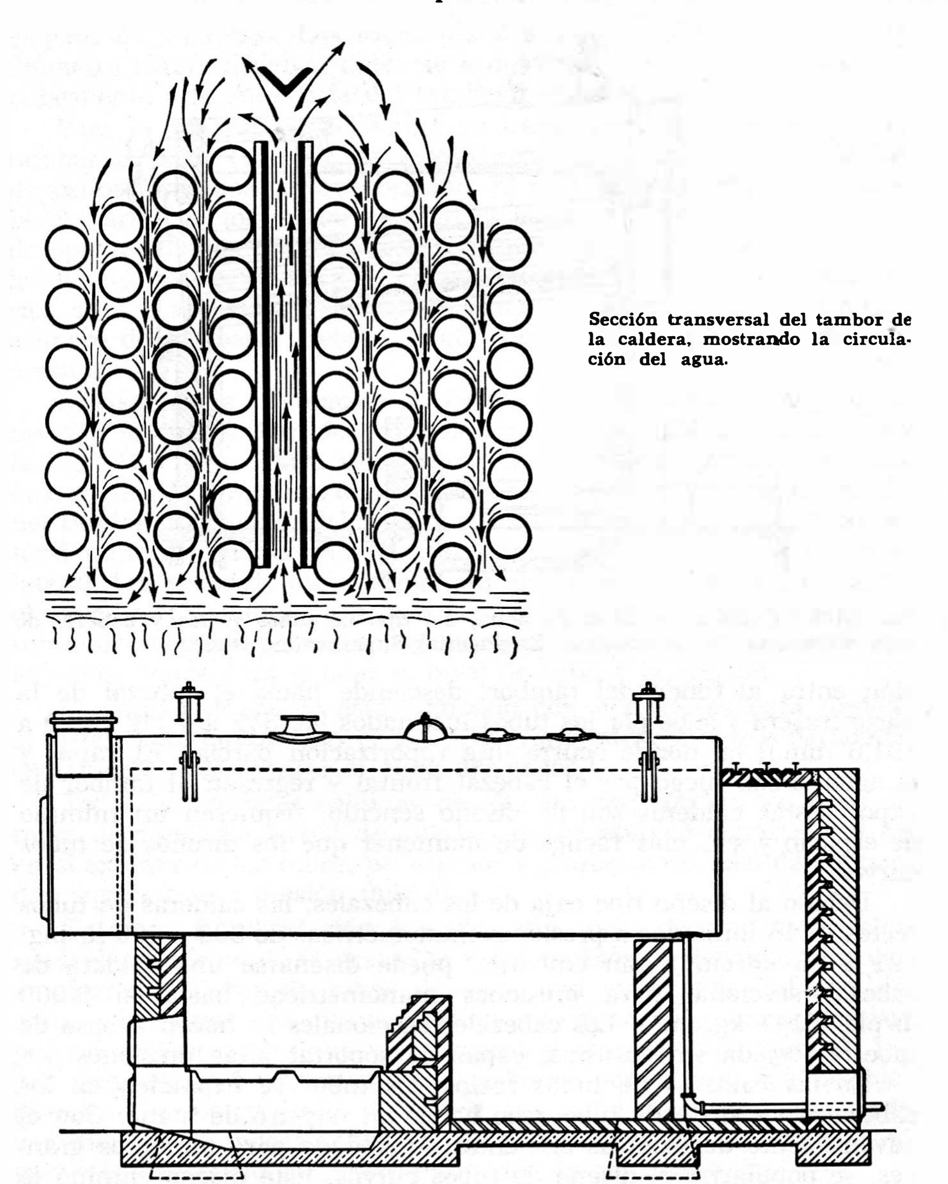


Fig. 21-2. Caldera de tubos de humo. (Cortesía de Combustión Engineering-Superheater, Inc.)

calientes se dirigen, mediante deflectores, a través del exterior de los tubos. Pueden clasificarse en calderas de tubos rectos y calderas de tubos curvos.

El diseño de tubos rectos (Fig. 21-3) tiene un tambor paralelo o transversal a unos tubos inclinados (a 10°). El agua de alimenta-

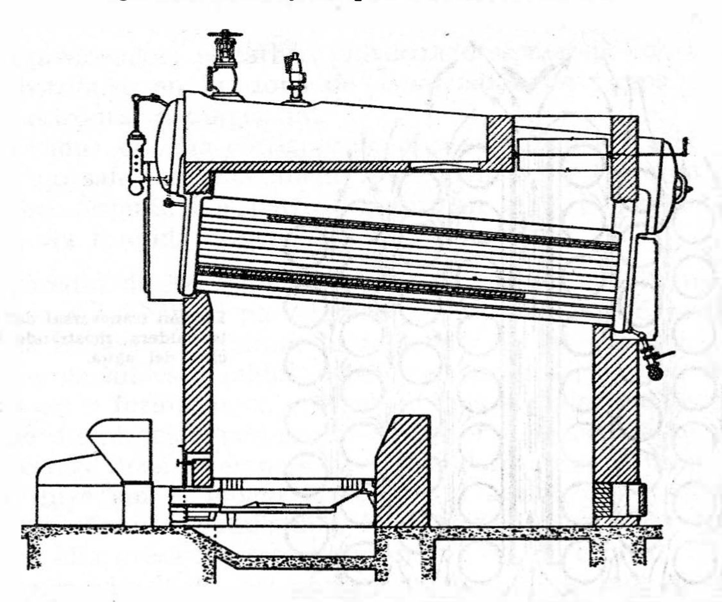


FIG. 21-3. Caldera de tubos de agua, del tipo de tubos rectos y cabezal de caja. (Cortesía de Combustión Engineering-Superheater, Inc.)

ción entra al fondo del tambor, desciende hacia el cabezal de la parte trasera y sube por los tubos inclinados [de 3½ a 4 plg (88.9 a 101.6 mm)] en donde ocurre una vaporización parcial. El vapor y el agua suben luego por el cabezal frontal y regresan al tambor de vapor. Estas calderas son de diseño sencillo, requieren un mínimo de espacio y son más fáciles de mantener que los diseños de tubos curvos.

Debido al diseño tipo caja de los cabezales, las calderas de tubos rectos están limitadas a presiones manométricas de 300 a 500 lb/plg^2 (21 a 35 kg/cm^2). Sin embargo, puede diseñarse una caldera de cabezal seccional para presiones manométricas hasta de 2 000 lb/plg^2 (141 kg/cm^2). Los cabezales seccionales se hacen a base de tubería forjada sin costuras, capaz de soportar altas presiones.

En las calderas de tubos rectos, los tubos se expanden en los cabezales y para cada tubo debe haber un registro de mano. Con el advenimiento de técnicas eficientes de soldado para tambores grandes, se popularizó el diseño de tubos curvos. Este diseño eliminó la necesidad de las bocas de acceso manual y aumentó la flexibilidad en las posibilidades de diseño. En este tipo de calderas, los tambores funcionan como cabezales y a la vez como separadores de vapor y agua.

Los diámetros de los tambores varían de 3 a 6 pies (92 a 184 cm) y tienen registros que permiten el acceso para la limpieza* y

* La limpieza de calderas por medios químicos está ganando amplia aceptación y elimina la necesidad de penetrar mecánicamente al interior de los tambores para su limpieza.

el paso de los tubos. Los tubos [de 2 a 2¼ plg (51 a 58 mm) de diámetro exterior] deben doblarse a manera de que entren perpendicularmente a la superficie del tambor (véase la Fig. 21-4).

Para la separación del vapor se usan tambores superiores y el tambor inferior (tambor de lodos) sirve como acumulador de los depósitos formados por evaporación. El número y arreglo de los tambores varía con los requerimientos de espacio y con las condiciones de operación. Las calderas más comunes son las de dos y tres tambores, aunque los diseños de cuatro tambores se usaron durante varios años. Las calderas modernas están construidas con el mínimo número de tambores, debido al alto precio de los tambores de alta presión.

El sistema de circulación se vuelve complejo con menos tambores, por lo cual se han desarrollado muchos arreglos de tuberías. En la Fig. 21-4 se muestra un sistema típico de circulación para una caldera de dos tambores, con cabezal frontal y lateral. El agua circula del tambor inferior, o del superior, hacia el cabezal de la pared lateral y luego asciende por los tubos frontales o por los de la pared lateral. Los tubos de atrás alimentan al tambor inferior y completan el circuito. Cuando se usa más de un tambor superior, bancos de tubos sirven por separado a cada tambor, aunque entre los tambores hay conexiones para igualar el nivel de agua y la presión.

El tambor de salida está equipado con deflectores para desviar al sistema de circulación el agua fría que entra y con separadores centrífugos para separar el agua del vapor.

Todas las grandes calderas de alta presión son de los tipos de tubos de agua. En virtud de que la presión está en el interior y no en el exterior de los tubos, un espesor y diámetro de tubo dados pueden soportar una presión más alta.

Calderas de circulación forzada. En lugar de una circulación natural por efecto de la gravedad y de cambios de densidad, pueden emplearse calderas de tubos de agua con circulación forzada del agua y del vapor. En diseños de un solo paso, el agua se bombea por un serpentín continuo y se evapora y sobrecalienta antes de llegar a la salida. No se requieren tambores, por lo cual son posibles grandes ahorros en costo, pero los tubos están a sobrecalentamiento y formación de incrustaciones en la parte en donde se forma el vapor, y la capacidad de almacenamiento de agua es baja.

Otro tipo de diseño de circulación forzada supera estas desventajas mediante recirculación. El agua pasa por un serpentín en el que se vaporiza parcialmente. La mezcla de vapor y agua descarga en un tambor en el cual el vapor se separa del agua antes de pasar por un sobrecalentador. El agua regresa a la succión de la bomba para ser recirculada.

Para una capacidad dada, todas las calderas de circulación forzada tienen tubos más pequeños y menor superficie de transmisión

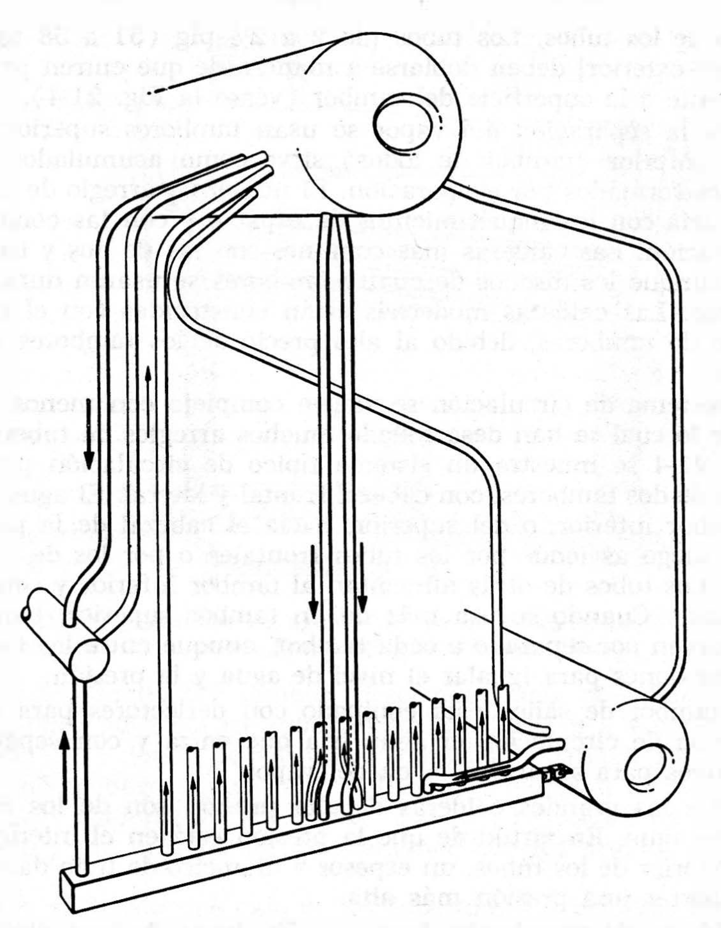


Fig. 21-4. Patrón de circulación en una caldera típica de tubos curvos. Cortesía de Combustión Engineering-Superheater, Inc., y reimpreso con autorización, C. E. Miller, *Mech. Eng.*, 73, No. 1, 10 (1951).

de calor que las calderas de circulación natural. Se pueden tolerar mayores flujos y caídas de presión, y las mayores velocidades de líquido y vapor producen una mejor transmisión de vapor.

Generadores de vapor estandarizados y paquete. En los últimos 15 años, la industria de fabricación de calderas ha estandarizado la construcción de muchos estilos. En varios tamaños se han diseñado calderas completas, y partes completas de las mismas se mantienen en línea. Si se ordena una caldera estándar, se requiere un mínimo de trabajo de ingeniería y dibujo por lo cual los ahorros son sustanciales.[19] Son comunes los tamaños con capacidades inferiores a 100 000 lb (45 360 kg) de vapor por hora.

Calderas más pequeñas, estandarizadas, se obtienen como unidades-paquete, las cuales son unidades completamente ensambladas

que se embarcan listas para instalarse. Las calderas de tubos de humo se construyen para capacidades desde 500 hasta 17 250 lb (225 a 7 850 kg) de vapor por hora y presiones manométricas de 10 a 600 lb/plg^2 (0.7 a 42 kg/cm^2)[4]. Las calderas de tubos de agua pueden producir el doble de vapor y a presiones manométricas hasta de 900 lb/plg^2 (63 kg/cm^2).

Las unidades-paquete se controlan de manera automática y, a diferencia de las grandes plantas generadoras de vapor, están diseñadas para operar eficientemente tanto a baja como a alta capacidad. Pueden ser instaladas al exterior y son ideales para localizaciones remotas. Estas características, así como su bajo costo, han popularizado mucho las unidades-paquete para plantas de proceso que requieren vapor en la unidad de proceso o cerca de ella. Son especialmente apropiadas para las demandas variables de muchas operaciones intermitentes.

La caldera tipo locomotora (que usa aceite como combustible) algunas veces se usa para instalaciones temporales en plantas de proceso. Puesto que su tambor no está expuesto al calor radiante de los quemadores, la caldera tipo locomotora puede operar a mayores presiones manométricas 400 lb/plg^2 (28 kg/cm^2) que las calderas convencionales de tubos de humo.

Calderas de calor de desecho. Un subproducto de muchos procesos es el calor. Las reacciones químicas exotérmicas, la regeneración de catalizadores de descomposición térmica y las pilas atómicas son, todos ellos, ejemplos de procesos que producen un calor llamado calor de desecho, ya que si no se usa se debe desperdiciar.

En varios casos el calor generado debe ser eliminado para que el proceso se lleve a cabo satisfactoriamente. En tales situaciones, para eliminar el calor y generar vapor, pueden emplearse las calderas de calor de desecho.

Tanto las calderas de tubos de humo como de tubos de agua deben ser especialmente diseñadas cuando van a utilizar calor de desecho, dado que el calor es suministrado únicamente por convección. En las calderas tipo de tubos de agua, los tubos de superficie aumentada pueden incrementar el área de transmisión de calor en el lado de los gases, en donde la resistencia al flujo de calor es alta.[7]

Es necesario efectuar estudios para determinar la economía de la recuperación del calor de desecho. En algunos casos el calor debe ser recuperado a un nivel tan bajo de disponibilidad o a un costo tan alto que resulta más barato desperdiciarlo.

SELECCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR

El diseño de los modernos generadores de vapor es un problema complejo que requiere el esfuerzo de personal experto. Se producen muchos diseños diferentes y cada uno es aplicable a una situación particular. En la Tabla 21-4 se presenta el rango de condiciones de

TABLA 21-4. RANGOS DE OPERACION DE GENERADORES DE VAPOR*

Equipo generador de vapor	Rango de capacidad continua lb de vapor por hora: 1000 a 15 000	15 000 a 35 000	35 000 a 150 000	150 000 a 1 000 000	Rango de presión de diseño (lb/plg²)	Temperatura de vapor (°F)
Caldera de tubos de humo	√	—	—	—	Hasta 250	Hasta 150 de sobrecalentamiento
Caldera de 3 tambores de cabezal bajo	√	√	—	—	Hasta 400	Hasta 150 de sobrecalentamiento
Caldera vertical de 2 tambores, tipo unitario	√	√	√	√†	Hasta 1000	Hasta 900
Caldera vertical de 3 o 4 tambores	—	√	√	√	Hasta 1500	Hasta 925
Caldera de cabezal seccional	—	√	√	—	Hasta 2000	Hasta 900
Caldera especial, tipo servicio termoeléctrico	—	—	—	√	Hasta 2500	Hasta 1050§
Caldera de circulación forzada controlada‡	√	√	√	√	Hasta aproximadamente 3000	Hasta 1050§

* Reimpreso con autorización, *Combustion Engineering*, Combustion Engineering-Superheater, Inc. (1947).
† Hasta aproximadamente 225 000 lb/hr con carbón y 300 000 lb/hr con aceite o gas.
‡ Las calderas de circulación forzada controlada se diseñan en varios tipos y tamaños para el rango completo de capacidades.
§ Máxima actualmente utilizada. Se dispone de diseños y materiales para mayores temperaturas.

operación para algunos tipos populares de generadores de vapor. Estos datos pueden servir como orientación, pero antes de poder hacer una selección inteligente se necesita consultar a los fabricantes y estudiar muchas ofertas.

Las presiones y temperaturas de operación de los generadores de vapor varían considerablemente. La eficiencia por lo general se incrementa al aumentar la presión y la temperatura, pero los costos del equipo también suben de manera correspondiente. Ordinariamente, para una planta de proceso son satisfactorias presiones manométricas de generación del orden de 400 lb/plg² (28 kg/cm²) y temperaturas de sobrecalentamiento en el rango de 150°F. Si los requerimientos de vapor para la generación de fuerza son grandes, por lo general es más económica una mayor presión de generación. Luego, del escape de las turbinas que accionan los generadores de fuerza, se obtiene un vapor de proceso a presión más baja.

La selección del generador de vapor y de la presión de generación depende de un estudio de los requerimientos de la planta y de los costos de operación. Aunque la eficiencia en la generación de vapor es de primordial importancia en la operación de una planta de servicio público, el costo inicial o la flexibilidad pueden ser las consideraciones más importantes para una planta de proceso.

Equipo auxiliar en la generación de vapor

La moderna planta generadora de vapor requiere una gran cantidad de equipo auxiliar. A continuación se discuten los renglones más importantes.

Servicios de tratamiento del agua de alimentación. El equipo requerido para el tratamiento del agua de alimentación incluye facilidades de almacenamiento y manejo de productos químicos, filtros, bombas de agua, tanques para sedimentación y almacenamiento, equipo de mezclado, bombas proporcionadoras y equipo para eliminación de lodos.

En ciertas plantas una gran parte del vapor de proceso se regresa a las calderas después de haber sido condensado en cambiadores de calor y otros equipos que utilizan vapor. Si se requiere una pequeña reposición de agua, se pueden usar evaporadores para suministrar a las calderas agua destilada como agua de reposición. Las grandes plantas de fuerza que emplean turbogeneradores de condensación invariablemente usan evaporadores para reponer las pequeñas pérdidas de agua del sistema. Para evitar una frecuente desincrustación del evaporador es necesario un tratamiento parcial del agua cruda.

Calentamiento del agua de alimentación (economizadores y calentadores del agua de alimentación). Las plantas generadoras de vapor descargan cierto calor con niveles bajos de disponibilidad, tal como el calor del vapor de escape y de los gases de chimenea. Para tener una máxima economía de combustible estas

fuentes de calor deben ser aprovechadas. Una aplicación de este suministro de calor es el calentador del agua de alimentación. Además de conservar calor, el calentamiento de esta agua reduce el choque térmico en las partes de la caldera y en algunos casos aumenta la capacidad de la misma.

Los calentadores de agua de alimentación usan vapor vivo o vapor de escape ya sea en el lado de la carcasa* cuando se trata de cambiadores de calor de carcasa y tubos, o bien por contacto directo de vapor y agua en un calentador desaerador.

En calentadores desaeradores el agua se rocía, a través de deflectores o charolas, en contracorriente con vapor de escape. El agua se calienta y algo de vapor se condensa. Todo el vapor sin condensar y los gases no condensables pasan a un condensador de venteo, el cual condensa el vapor y ventea los gases.

La desaeración del agua de alimentación es necesaria para reducir la corrosión de la caldera. Algunas plantas de fuerza usan calentadores de carcasa y tubos para el agua de alimentación, seguidos por desaeradores individuales que operan a presión subatmosférica. Estos desaeradores al vacío reducen al mínimo el contenido de oxígeno disuelto en el agua.

El agua de alimentación puede ser posteriormente tratada en unos intercambiadores llamados economizadores, localizados en la trayectoria de los gases de la chimenea de la caldera. El más común de éstos consta de varias secciones de tubo en U colocadas unas junto a otras. En muchos diseños se usan tubos de aletas para aumentar la transmisión de calor. Si el agua tiende a formar incrustaciones perjudiciales, las curvas de retorno removibles pueden ser instaladas en un extremo.

TAMBOR DE COMPENSACIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN. El agua de alimentación, calentada, y el condensado que se retorna se acumulan generalmente en un recipiente que constituye una cámara de compensación para el agua de alimentación. El calentador desaerador del agua de alimentación puede formar parte del recipiente. Dicho recipiente es más necesario para los servicios de fuerza de la planta de proceso que tienen cargas variables que para las cargas uniformes de las plantas de fuerza de servicio público.

BOMBAS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERAS. El agua de alimentación, tratada y desaerada, se toma de un calentador de agua de alimentación o cámara de compensación y se bombea al generador de vapor. Las bombas del agua de alimentación pueden ser accionadas por motor eléctrico o turbina de vapor. Por lo general, las transmisiones de turbina se controlan con mayor facilidad. En casi todas las instalaciones se usan bombas centrífugas de múltiples pasos y se necesita al menos una bomba de repuesto.

*** Algunos calentadores tienen vapor en el lado de los tubos.**

En instalaciones más grandes, para tener flexibilidad, se pueden usar varias bombas en serie o en paralelo. Con independencia del arreglo del equipo, para evitar la vaporización se debe disponer de suficiente cabezal neto positivo de succión.

SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE. Deben tenerse facilidades de almacenamiento para todos los tipos de combustibles, con excepción del gas natural. El gas manufacturado, no obstante, a veces requiere, para compensaciones de cargas, un sistema de retención de gas o de almacenamiento a presión.

EQUIPO DE TIRO FORZADO E INDUCIDO. La función del sistema de tiro es proporcionar aire suficiente para la completa combustión del combustible. Los generadores de vapor pueden operar con tiro natural, tiro inducido, tiro forzado o combinaciones de los tres. El tiro natural se usa para hornos pequeños y la chimenea debe ser diseñada para desarrollar los diferenciales necesarios de presión.*

Sin embargo, prácticamente todos los grandes generadores de vapor usan equipo de tiro forzado e inducido. El sistema de tiro forzado inyecta aire primario con el combustible y aire secundario al horno en las aberturas del quemador o cerca de ellas. El sistema de tiro inducido propicia una presión reducida en el horno al eliminar los gases calientes de combustión mediante un ventilador, induciendo de esta manera el aire primario y el aire secundario.

Puesto que la relación aire-combustible es crítica, las condiciones del hogar deben ser estrechamente controladas. Para este control puede usarse tanto el ventilador de tiro forzado como el de tiro inducido, junto con reguladores apropiados de tiro. Las unidades de tiro natural deben ser controladas sólo por reguladores.

PRECALENTADORES DE AIRE. Con frecuencia, el aire que entra es forzado a través de precalentadores de aire para intercambio de calor con los gases calientes de combustión. La superficie de transmisión de calor puede estar constituida por placas delgadas o por tubos. Si no se usan precalentadores, parte del aire que entra suele conducirse por canales del refractario del horno, a veces por el piso, con lo cual dicho aire se calienta.

SOPLADORES DE HOLLÍN. Todos los combustibles depositan, sobre las superficies del horno, polvo no combustible. Estos depósitos son muy pesados en el caso de combustibles sólidos y son despreciables para la mayoría de los gases naturales. Dichos depósitos aislan las superficies transmisoras de calor y reducen la eficiencia, por lo cual deben ser removidos. Los sopladores de hollín se localizan a manera de poder limpiar la superficie de calentamiento sobre la que el hollín se acumula. Por tubos que tienen una serie de orificios se hace pasar, a alta presión, vapor, aire o una mezcla de ambos.

* Cabezal disponible $= H(\rho_a - \rho_c)$
en donde H = altura de la chimenea
ρ_a = densidad del aire exterior y
ρ_c = densidad promedio de los gases de chimenea

Conforme el limpiador se va girando axialmente, el hollín se desprende de las superficies de calentamiento.

SOBRECALENTADORES. El equipo que trabaja con vapor, para operar eficientemente y sin erosión, requiere vapor seco sobrecalentado. La eficiencia de las unidades generadoras de vapor con capacidades superiores a 15 000 lb (6 800 kg) por hora, también mejora si el vapor producido es sobrecalentado. Por consiguiente, en la mayoría de las calderas modernas se instalan sobrecalentadores. Estos pueden ser cambiadores de calor expuestos a los gases calientes de chimeneas (tipo convección) o a la energía radiante de la flama (tipo radiante).

A medida que la carga de una caldera es incrementada, el flujo de gases de combustión y la temperatura aumentan más aprisa que el flujo de vapor y sube la temperatura de salida del sobrecalentador tipo convección. El efecto inverso de temperatura ocurre en un sobrecalentador tipo radiante, pero una combinación de ambos efectos da una temperatura de salida de vapor razonablemente constante, con independencia de la carga.

Con frecuencia, para operaciones tales como la limpieza a vapor, se suministra vapor sobrecalentado cerca del punto de uso, calentando vapor de la planta en la sección de convección de un recalentador de fuego directo.

DESOBRECALENTADORES. Ciertos evaporadores para productos químicos que hierven a bajas temperaturas requieren vapor saturado. Si la planta central de vapor produce vapor sobrecalentado, por medio de un desobrecalentador se puede tener vapor saturado en donde se necesite.

Los desobrecalentadores pueden ser cambiadores de calor del tipo de espreas o del tipo de carcasa y tubos. En el tipo de espreas, en el vapor circulante se rocía agua pura, tal como condensado o agua de alimentación. En el diseño de carcasa y tubos se usa agua normal de enfriamiento, ya que no hay contacto directo entre el agua y el vapor.

INSTRUMENTACIÓN DE LAS PLANTAS DE VAPOR. En comparación con la instrumentación de las plantas de proceso, la de las plantas generadoras de vapor es relativamente sencilla. Las condiciones controladas son:

(*a*) Presión de vapor. (En ciertos generadores de alta presión y alta temperatura, ésta puede ser tan crítica o más que aquélla. De ordinario, el control de temperatura no es importante, excepto para grandes plantas generadoras de fuerza eléctrica.
(*b*) Relación aire-combustible.
(*c*) Agua de alimentación.

En pocas palabras, la acción de control es como sigue:

Un aumento en la demanda de vapor ocasiona una caída en la presión del sistema de distribución. Los instrumentos de presión detectan esta caída y aumentan el flujo de combustible. El control del flujo de aire es correspondientemente incrementado por un controlador adecuado, el cual aumenta la velocidad de los ventiladores de aire u otros controles que operen los reguladores de tiro. Conforme la presión de la caldera cae, la generación de vapor aumenta, bajando el nivel de agua de caldera, lo cual hace que el control de nivel del agua de alimentación admita más agua. La misma acción tiene lugar en sentido inverso cuando la presión de vapor aumenta.

La admisión de agua de alimentación no puede ser controlada de manera satisfactoria únicamente por el nivel. Una caída en la presión de vapor aumentará el flujo de agua de alimentación debido a la reducción en la presión. Si sólo el nivel de agua es el que controla, la admisión de agua de alimentación aumentará igualmente por una caída en la presión de vapor como por una caída en el nivel del agua de alimentación. Por esta razón, para las bombas del agua de alimentación se usan controles de presión diferencial que utilizan presión del generador de vapor y presión de la descarga de la bomba. Un aumento o caída en la presión de vapor produce un cambio controlado en la presión de descarga de la bomba del agua de alimentación, con el cual se mantiene la misma presión diferencial a través de la válvula de control del nivel de esta agua.

El tamaño del generador de vapor y el tipo de combustible tienen influencia en la selección de los sistemas de control. Los combustibles sólidos requieren sistemas de control mucho más complicados, debido al equipo mecánico de encendido. Los sistemas de combustibles líquidos y gaseosos pueden ser controlados cambiando la presión del sistema.

Además de la instrumentación anterior se necesitan muchos instrumentos registradores e indicadores. Manómetros para el tiro, indicadores o registradores de temperatura e instrumentos de flujo y presión se usan extensamente. Para los generadores más grandes, un equipo analizador continuo registra los componentes de los gases de combustión.

El aspecto exterior de muchas plantas de fuerza que están siendo construidas es similar al de las unidades de proceso. Todos los instrumentos se centralizan en un cuarto de control y los controles son completamente automáticos, de manera que es raro que los operarios salgan del citado cuarto. Estas unidades son operadas por una pequeña cuadrilla y ofrecen un notorio contraste con las antiguas calderas "operadas a mano".

Sistemas de distribución de vapor

Las tuberías de distribución de vapor deben estar cuidadosamente diseñadas para asegurar una operación prolongada, exenta de pro-

blemas. El sistema ideal de vapor debe proporcionar vapor continuamente con el mínimo de mantenimiento.

TAMAÑO DE LAS LÍNEAS. Los tamaños de las líneas para vapor no deben estar gobernados únicamente por la caída de presión. Las pérdidas de calor pueden reducirse usando altas velocidades, como se sugiere en la Tabla 21-5.

TABLA 21-5. VELOCIDADES CONVENCIONALES PARA TUBERIA DE DISTRIBUCION DE VAPOR*

Condición del vapor	Presión manométrica, lb/plg²	Servicio	Velocidad razonable, pies/min
Saturado	0–15	Calentamiento (líneas cortas)	4000 a 6000
Saturado	50 y más	Diverso†	6000 a 10 000
Sobrecalentado	200 y más	Diverso	7000 a 20 000

* Reimpresa con autorización, Crane Technical Paper No. 409 (1942), Crane, Co., Chicago, Ill.

† La velocidad del vapor, en el caso de líneas de calderas, debe ser más baja que las grandes líneas de turbinas debido a las válvulas de retención que necesariamente se instalan en estas líneas. Una alta velocidad a través de la válvula de retención causaría una caída excesiva de presión que perjudicaría la operación eficiente.

LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. La tubería del sistema de distribución puede correr a nivel del piso, sobre "durmientes" de concreto, o de preferencia arriba del nivel del piso sobre soportes de acero estructural o de concreto reforzado. Las tuberías que van a nivel del piso constituyen un obstáculo y al cruzar las calzadas deben ser sepultadas o elevadas, lo cual origina en la línea una bolsa en donde el condensado puede quedar atrapado.

El condensado debe ser acumulado en puntos predeterminados de la tubería de distribución y en los puntos de uso, y luego debe ser descargado continuamente, por medio de trampas de vapor, en un sistema de condensado para su regreso al cuarto de calderas. Es muy conveniente que la tubería de retorno corra cerca de la tubería principal de distribución a modo de que las trampas de vapor de esta última tubería puedan descargar en la tubería de condensado. Si se usan varios sistemas de vapor a diferentes presiones, las trampas de vapor pueden ser dispuestas a manera de que descarguen individualmente en servicios de presión sucesivamente más baja.

Mediante un cuidadoso arreglo de válvulas y tubería‡ debe evitarse la acumulación de condensado en puntos diferentes a los que tienen trampas de vapor. Los ramales de los cabezales principales deben salir verticalmente de la parte superior del cabezal y luego correr horizontalmente lo que se requiera. En el trayecto horizontal de la tubería se pueden instalar válvulas de retención, con lo que el

‡ En climas fríos la congelación del condensado atrapado en las líneas puede acarrear grandes dificultades.

condensado drenará libremente en cualquier lado de la válvula. Los pasos de desvío ("by-passes") de las válvulas deben localizarse encima de ellas, con un pequeño purgador instalado entre las válvulas del paso de desvío.

En largos tramos horizontales de tubería se instalan piernas para acumulación de condensado. Dichas piernas se construyen de tubo y tapones-cachucha, dos medidas mayores que el tamaño de la línea, y se sueldan verticalmente en la parte más baja del tramo de tubería considerado. En la pierna de condensado se instala una placa vertical para desviar el vapor y la humedad hacia la pierna. En tanto que el vapor hace una vuelta de 180°, el agua cae a la pierna. Para separar el condensado, en el fondo de la pierna se conecta una trampa de vapor.

VÁLVULAS DE RETENCIÓN. Estas válvulas se localizan al principio de cada ramal con respecto al cabezal principal. Con fines de calentamiento cada válvula de retención se puentea con pequeños pasos de desvío (de 19 a 25 mm), con objeto de que una línea fría pueda ser calentada gradualmente antes de admitir el flujo total de vapor. Como precaución adicional, en cada punto de uso generalmente se localiza otra válvula de retención.

Empero, en líneas de vapor de escape, algunas compañías instalan solamente una válvula de retención en el cabezal ya que este tipo de vapor es menos peligroso. Sin embargo, si se omitiera cerrar la válvula del cabezal, se tendría la descarga de grandes cantidades de vapor en toda el área.

AISLAMIENTO. El aislamiento para las tuberías de vapor, especialmente para los cabezales principales, debe ser seleccionado y diseñado para una duración prolongada. Por lo general, para las líneas de vapor se recomiendan estudios económicos sobre el espesor óptimo del aislamiento, ya que de esta manera los costos se definen con mayor claridad. Dichos estudios deben ser efectuados para las líneas de diámetros grandes.

Fuerza de combustión interna

En la planta de proceso las máquinas de combustión interna se usan como accionamientos de servicio pesado para bombas y compresoras de movimiento alternativo y para generadores de fuerza eléctrica. Las grandes compresoras de movimiento alternativo generalmente se construyen en forma integral con el accionamiento de la máquina: el mismo cigüeñal se utiliza tanto para la máquina accionadora como para la de movimiento alternativo (véase el Cap. 15). Las bombas de movimiento alternativo se suministran como unidades separadas, con transmisión de fuerza a través de engranes y flechas.

Los sistemas de combustible para máquinas de combustión interna deben ser diseñados para evitar que penetre material extraño

a la máquina. Todo combustible debe filtrarse sin importar su origen, y la tubería que sigue del filtro debe ser de material no ferroso o de acero inoxidable para que no haya formación de incrustaciones. Un suministro centralizado de lubricante con distribución entubada para una o varias máquinas también reduce la cantidad de materiales extraños que pudieran ser introducidos.

Con la tubería de toma de aire se debe tener especial cuidado. Por lo general estos tramos están por debajo del nivel del filtro de aire a la tubería del múltiple de la máquina. No son suministrados por el fabricante de la máquina. Puesto que esta tubería no queda fácilmente accesible para inspección, el tratamiento e inspección del interior deben ser realizados definitivamente antes de la instalación. Toda tubería de admisión de aire que vaya por debajo del piso debe ser limpiada con ácido o sopleteada con arena (o ambas cosas), inspeccionada por su interior (la mayoría de las tuberías de admisión es de tamaño suficiente para permitir dicha inspección), tratada inmediatamente con algún tipo confiable de inhibidor de oxidación y luego pintada o esmaltada. También se usan el metalizado con aluminio, cuando se aplica con cuidado, o forros ligeros de acero inoxidable o de metales no ferrosos.

Por lo general la instrumentación para las máquinas de combustión interna consiste en:

(*a*) Control de combustible.

(*b*) Parada automática, operable desde elementos de presión y elementos de temperatura, al fallar el agua de enfriamiento o el aceite lubricante; se requieren señales audibles y visibles, pero no son necesariamente suministradas por el fabricante de la máquina.

Almacenamiento y movimiento de materias primas y productos

En la operación de una planta de proceso son esenciales las facilidades adecuadas de almacenamiento, tanto para las materias primas como para los productos. Un suministro correcto de materias primas permite operar la planta con independencia de procuraciones temporales o de dificultades en la entrega. El espacio de almacenamiento para los productos terminados hace posible surtir pedidos a los clientes aun en épocas de dificultades en la planta.

Almacenamiento líquido

Para líquidos que pueden ser almacenados a presiones bajas se usan tanques cilíndricos verticales. Casi toda la tanquería de este tipo se construye de acuerdo con el Estándar 12*c* del American Petroleum Institute. Aunque esta especificación fue desarrollada básicamente para la industria petrolera, consiste en un excelente conjunto

de reglas para casi cualquier tipo de tanque. La estandarización de las técnicas de construcción de tanques y de los accesorios para los mismos, propiciada por este código, ha sido una gran ayuda de ingeniería y procuración. El Consejo Nacional de Aseguradores contra Incendios (National Board of Fire Underwriters) y la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association) también publican reglas para construcción de tanques de almacenamiento.[27] (Véase también el Cap. 24).

El tipo más común de tanque para almacenamiento a presión atmosférica es un tanque con techo cónico, provisto con marcas exteriores de nivel, mirillas de inspección, bocas de acceso, una escala o escalera y un venteo para mantener la presión atmosférica. Para materiales con bajas presiones de vapor, el venteo puede ser de tipo abierto y sus dimensiones de acuerdo con el área del tanque y la capacidad de bombeo.* El venteo abierto se construye a partir de un tubo con una gran abertura en su circunferencia superior. Esta abertura se protege del viento y la lluvia por medio de un sombrero que dirige hacia abajo el flujo de vapores.

Los tanques para almacenamiento de líquidos con presiones de vapor significativas (más de 1 lb/plg^2) a la temperatura atmosférica requieren venteos de presión-vacío (conservación). Estos venteos abren solamente cuando la presión del tanque llega a ser excesivamente baja o alta, conservando así vapores valiosos.

Los tanques de techo flotante se usan para conservar productos valiosos cuyas presiones de vapor a la temperatura de operación son inferiores a la atmosférica (hasta 8 lb/plg^2, aproximadamente). El techo flota sobre la superficie del líquido, eliminando así el espacio de vapor. El espacio que queda entre el techo y la pared del tanque se sella por medio de una cortina de tela recubierta con hule sintético.

Si en tanques con venteo se almacenan líquidos inflamables, deben instalarse parallamas en todas las aberturas, con excepción de las conexiones que se hagan por debajo del nivel del líquido. Como parallamas puede usarse una tela metálica de 40 mallas o uno comprado. Este último consta de varias placas delgadas instaladas en una pequeña cámara. En ambos tipos la propagación de la flama dentro del tanque se previene mediante una rápida disipación del calor por las partes metálicas del parallamas.

En todos los tanques de almacenamiento con venteo que contengan líquidos inflamables se instalan conexiones de espuma apagadora. Areas grandes de tanques de almacenamiento pueden ser servidas por medio de un sistema central. Puesto que no tienen espacio de vapor los tanques de techo flotante no necesitan estar equipados con un sistema extinguidor permanente.

*** La capacidad de aire en pies cúbicos estándares debe ser cuando menos el doble de la capacidad de bombeo. Existe literatura técnica[15] sobre especificaciones detalladas de venteo.**

Los líquidos con presiones de vapor sobre la atmosférica deben ser almacenados en tanques herméticos a los vapores y que sean capaces de soportar presión interna. En el rango de presión manométrica de 2 a 215 lb/plg^2 se puede usar acero delgado, similar al de los tanques verticales de almacenamiento, siempre y cuando los tanques se construyan en forma esférica (presión manométrica de trabajo: 30 a 215 lb/plg^2) o esferoidea (presión manométrica de trabajo: 2 a 30 lb/plg^2).

Para presiones mayores, es más económico usar varios recipientes estándares a presión, cilíndricos y de diámetro pequeño (3 a 6 pies). Estos se instalan horizontalmente y adyacentes entre sí. En cada recipiente se colocan válvulas de alivio, las cuales descargan en un cabezal común.

Para el almacenamiento de agua, la tanquería generalmente es elevada, y, si forma parte del sistema de agua contra incendio, se diseña de acuerdo con los códigos de seguros contra incendio (véase el Cap. 24).

Además de materias primas y productos inflamables y volátiles, muchos líquidos corrosivos deben ser almacenados en las plantas de proceso. Se han usado con éxito tanques de acero forrados con plástico, hule, plomo, así como ladrillos especiales y otros materiales de cerámica, particularmente a temperaturas más bajas. A temperaturas más altas se necesitan aceros aleados o aceros con revestimientos no ferrosos.

Almacenamiento de gas

A la presión atmosférica, los gases se almacenan en recipientes de sello húmedo o sello seco. El recipiente de sello húmedo es el tipo conocido que se emplea para almacenamiento municipal. El gas se admite en un tanque (recipiente), el cual está invertido en un tanque lleno de agua. Conforme el gas entra en el recipiente, el agua se desplaza y el recipiente asciende.

El recipiente de sello seco, un desarrollo más reciente, es similar a un techo flotante. El sello entre el techo y la pared del tanque se hace por medio de una cortina flexible de hule sintético o de plástico y el techo sube o baja con la presión. El recipiente de sello seco no requiere serpentines de calentamiento para evitar la congelación del agua, como los requeridos por el sistema de sello húmedo, y es de particular utilidad para el almacenamiento de gases que deben conservarse secos.

El gas natural e inclusive productos gaseosos pueden ser almacenados bajo el suelo, bombeando el gas hacia aquellas capas del subsuelo que sean prácticamente impermeables a los gases.

El gas de alta presión se almacena en recipientes de presión cilíndricos horizontales. Gases como el N_2, H_2 y O_2 se embarcan en

cilindros de gas diseñados de acuerdo con las reglamentaciones de la Interstate Commerce Commission.

Almacenamiento de sólidos

Las materias primas y productos sólidos se almacenan en tanques herméticos a la intemperie y en silos con fondos inclinados o en apilamientos exteriores. Los productos sólidos que descargan de hojueleadores o secadores con frecuencia son directamente empacados en sacos o en cuñetes metálicos o de fibra. En las bodegas, estos sacos y cuñetes se almacenan sobre tarimas, en espera de ser embarcados.

Movimiento de materias primas y productos hacia el punto de embarque

Dentro de la planta el movimiento, al punto de embarque y viceversa, de materias primas y productos líquidos y gaseosos se hace por tuberías. Las bombas de traslado se agrupan con objeto de simplificar la distribución de fuerza y reducir la mano de obra. Para el personal de las bombas se proporciona una caseta, aunque ésta no es necesaria para las bombas.

Para una mayor flexibilidad, las tuberías de succión y de descarga se disponen a manera de conjunto. Esto se logra haciendo correr, paralelamente y al mismo nivel (de 30 a 45 cm sobre el suelo), todas las tuberías que entran al área de bombeo. Las líneas de succión y de descarga de las bombas de traslado se localizan más arriba de dicho conjunto y se conectan con él por medio de tubos de subida. Las válvulas se encuentran en estos tubos conectores. De esta manera, una sola línea de descarga o de succión puede ser conectada a varias líneas de traslado y las válvulas pueden ser fácilmente alcanzadas por los operadores de las bombas.

Algunas plantas transportan materias primas y productos por tuberías. Cuando éste es el caso, las reglamentaciones locales y federales sobre diseño y tendido de tuberías deben ser estrictamente observadas. Los terrenos se deben comprar o arrendar, pero después de haberlos seleccionado con todo cuidado, ya que la tubería no debe pasar cerca de zonas residenciales existentes o en proyecto.

Las líneas que pasen bajo carreteras o vías férreas deben habilitarse con una camisa exterior hecha de tubo soldado a la tubería y venteado a la atmósfera a distancias especificadas de la carretera o vía férrea. Deben utilizarse cualesquiera otras precauciones posibles sobre seguridad.

Dentro de la planta, los materiales sólidos se mueven por medio de transportadores, elevadores de cangilones, canaletas, montacargas y sistemas neumáticos. Continúa introduciéndose nuevo equipo para manejo de materiales y las faenas de mover sólidos ya no constituyen una difícil operación manual.

SERVICIOS SECUNDARIOS

Servicios de mantenimiento

Cada planta de proceso debe tener un taller mecánico equipado con la maquinaria estándar, como tornos, esmeriles y taladros de banco. Por lo general, las plantas grandes tienen talleres completos para trabajos relacionados con máquinas y calderas, fabricación de tubería, reparación de instrumentos, reparación de equipo eléctrico y carpintería. En virtud de que para las interrupciones normales y para la reparación de las unidades de operación debe mantenerse una gran mano de obra mecánica, el mismo personal puede ser empleado durante los periodos de operación para el mantenimiento regular y para la construcción de equipo especial.

Los trabajos pequeños de mantenimiento pueden ser efectuados en la unidad de proceso. Para responder a las llamadas de emergencia y para hacer reparaciones rápidas se usan vehículos de motor especialmente habilitados en los que se llevan herramientas y refacciones pequeñas. Muchas veces las reparaciones más extensas se realizan más adecuadamente en el taller y para transportar hasta este sitio el equipo se utilizan grúas móviles y pequeños montacargas.

La planeación de los servicios de mantenimiento se facilita grandemente si para cada equipo se dispone, en forma completa, de las listas de partes de repuesto y de las instrucciones de mantenimiento proporcionadas por el fabricante. Dichos elementos pueden emplearse como una orientación hacia el objetivo que del trabajo de mantenimiento es de esperarse en una planta, así como una ayuda en la planeación de necesidades tan variables como:

a. requerimientos de personal.
b. cantidad y tipo de maquinaria y herramientas de mano.
c. espacio de almacenamiento para partes de repuesto y equipo nuevo.
d. área de salvamento para equipos y partes viejos.
e. cantidad y tipos de equipos de manejo (carros, malacates, etc.).

Calzadas de la planta

Las calzadas de las plantas de proceso están diseñadas para permitir un fácil acceso, a todas las partes de la planta, del equipo móvil de servicio, camiones y aparatos contra incendios. Las calzadas se localizan a manera de que cada área de proceso sea accesible desde todos los lados.

Las calzadas se diseñan de acuerdo con las prácticas usuales para caminos y las entradas desde las carreteras públicas deben ser hechas conforme a los métodos locales de diseño. Para las avenidas

principales de la planta se usa concreto reforzado, puesto que el trabajo de mantenimiento sobre este material es despreciable. Las calles secundarias pueden ser de macadam o de grava, pero deben diseñarse para manejar las cargas producidas por equipo tal como grúas viajeras.

Las avenidas principales de dos carriles no deben tener menos de 20 pies de anchura. Las calles cortas que sirven de entrada a las áreas de proceso pueden ser más angostas, pero deben ser adecuadas para que los camiones y grúas pasen sobre ellas cuando prestan sus servicios en dichas áreas.

Servicios de ferrocarril

Los servicios de ferrocarril son necesarios para el embarque y la recepción de materiales. Por lo general, los ferrocarriles locales proporcionan sin costo todas las especificaciones requeridas y una cierta cantidad del equipo necesario, tal como desviaciones laterales de su sistema y, en algunos casos, pueden instalar espuelas. Antes de preparar especificaciones o diseñar el sistema de vías, debe consultarse a los operadores de los ferrocarriles locales. Existen limitaciones impuestas por estatutos o por los operadores locales sobre el tamaño de los rieles (peso por yarda), pendientes, radios de curvas, tipo y diseño de cambiavías y pasos libres.

El equipo de espuelas (desviaciones laterales) y de cambio de vías debe cumplir con los requerimientos de los transportes de servicio. Si una espuela debe cruzar un camino público, el operador de los ferrocarriles o el propietario de la planta obtendrán un permiso formal y se apegarán a los requerimientos para tales cruceros.

El sistema de vías férreas por lo general se tiende sobre durmientes de madera. En cada durmiente se colocan placas de asiento para los rieles, y para conectar los extremos de los rieles se usan barras angulares. La medida estándar para los ferrocarriles norteamericanos es de 4 pies 8½ plg (1.435 m) entre los bordes interiores de las cabezas de los rieles. Para espuelas de plantas, los rieles, barras angulares y placas de asiento de los rieles sobre durmientes pueden obtenerse de segunda mano, puesto que desde antes se sabe que no habrá tráfico a alta velocidad.

El peso de los rieles para el sistema de vías de la planta puede ser de 60 a 100 lb/yd. Las longitudes de los rieles varían de 25 a 30 pies. Los durmientes son de aproximadamente 8 plg $\times$ 8 plg, por 8 pies 0 plg de longitud.

Sistemas de drenaje y eliminación de desechos de la planta

En una planta de proceso las fuentes primordiales de aguas de drenaje y de desecho son los servicios sanitarios, los desagües del proceso y el drenado superficial. El sistema de drenaje de la planta

debe ser diseñado para conducir estos desperdicios al sistema de eliminación, sin que se produzcan obstrucciones con sólidos o concentraciones peligrosas de gases explosivos.

Consideraciones generales

Los sistemas de drenaje para las plantas de proceso pueden consistir en una o más líneas principales de drenaje con ramales de cada área por drenar. La línea principal de drenaje debe tener la suficiente profundidad para recibir las descargas de los ramales de cualquier área de la planta o de áreas previstas para ampliaciones.

A las líneas de drenaje se les debe dar la pendiente necesaria para tener el cabezal suficiente que produzca velocidades de 2½ a 3 pies por segundo (5 como máximo). Estas velocidades son necesarias para evitar el asentamiento de sólidos. Los mapas de las curvas de nivel del área de la planta son de utilidad para planear la localización del drenaje principal a modo que los ramales de todas las áreas puedan tener las pendientes apropiadas.

Para evitar que los drenajes se tapen y para facilitar su limpieza, las líneas deben correr sin cambios de dirección entre registros y entre coladeras y registros. Para ramales que no contengan coladeras debe haber conexiones de limpieza.

En las líneas principales de drenaje los registros (Fig. 21-5) se localizan en cada cambio de dirección y en los tramos rectos de tubería debe haber un registro aproximadamente cada 200 pies (60 m). Siempre que sea posible, los ramales (laterales) deben conectar con las líneas principales en un registro. En áreas peligrosas los registros tienen tapas selladas con venteos que descargan en una área no peligrosa. Los registros por los cuales pasan materiales inflamables deben aislarse por medio de un sello de agua para evitar la propagación de incendios o explosiones (Fig. 21-5).

Los registros se construyen de ladrillo común, ladrillo acidorresistente, concreto con revestimiento de ladrillo o concreto solo. Las tapas de los registros, las rejillas y otros accesorios, por lo general son de hierro fundido.

Las coladeras se usan para recoger el drenado superficial o el del proceso. Para salir de la coladera y entrar al drenaje, el agua hace una vuelta de 180°. En esta forma los sedimentos quedan atrapados en el fondo de la coladera. Las coladeras se construyen de concreto y tienen tapas ranuradas de hierro fundido.

El tubo de concreto reforzado es el que más se emplea para drenajes. Por debajo de calzadas pavimentadas y cerca de cimentaciones u otras estructuras, se prefiere el hierro fundido. La cerámica vitrificada se usa bastante para áreas en donde los materiales de desecho pueden entrar al sistema de drenaje y el tubo de plomo se emplea para desechos de ácidos concentrados. Para drenajes sanitarios se usa tubería de hierro negro.

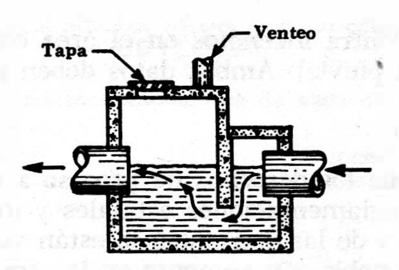


Fig. 21-5. **Registro de drenaje con sello para aislamiento de explosiones e incendios.**

Desagües superficiales

Para diseñar los sistemas de desagües superficiales los datos requeridos son la intensidad de la precipitación pluvial y el escurrimiento. La intensidad se mide en pulgadas de agua por hora y puede ser obtenida en las oficinas meteorológicas locales o en el Departamento de Agricultura.* En el territorio de los Estados Unidos la intensidad de la precipitación pluvial varía desde 0.25 plg (6.4 mm) en ciertas partes del noroeste, hasta 1.50 plg (38.1 mm) en las áreas centrales del territorio, 1.00 plg (25.4 mm) en algunas partes del este y 2.25 plg (57.2 mm) a lo largo de la costa del Golfo. En las mismas áreas del noroeste, la precipitación anual puede ser de 40 plg (1016 mm), en tanto que ciertas zonas áridas del suroeste tienen una precipitación anual de 8 plg (203.3 mm), con intensidades de 0.75 plg (19.0 mm). Puesto que las intensidades máximas son más importantes que los promedios, en los servicios meteorológicos locales deben investigarse datos sobre las precipitaciones esporádicas, pero en extremo intensas.

El escurrimiento es el porcentaje de precipitación pluvial que no es absorbido por el suelo, por lo cual es la cantidad que determina el tamaño de las cañerías. El valor puede variar desde 100% para las áreas pavimentadas o para las azoteas, hasta cero para suelos permeables secos. La mayoría de los datos publicados se basan en sistemas citadinos de drenajes y en rangos de 10% a 75%. Estos valores se emplean para superficies extremadamente grandes y no son muy utilizables como criterio para plantas de proceso en donde un alto porcentaje del área total puede estar pavimentada o cubierta por estructuras techadas. Por consiguiente, para las áreas relativamente pequeñas servidas por un solo drenaje, es preferible suponer un escurrimiento de 100% en virtud de que con frecuencia estas áreas están pavimentadas y son adyacentes a edificios techados.

El escurrimiento en áreas de proceso pavimentadas, encerradas por muros contra incendios, puede estar gobernado por la capacidad

* Por supuesto, el autor se refiere a los Estados Unidos de Norteamérica. (N. del T.)

de las mangueras contra incendios en el área considerada más que por la precipitación pluvial. Ambos datos deben ser verificados.

Desechos de proceso

La eliminación de los desechos de proceso a menudo es un problema difícil. Las reglamentaciones estatales y locales sobre la contaminación del aire y de las corrientes se están volviendo más estrictas a medida que la población aumenta en las áreas industriales. Los operadores de las plantas están cada vez más pendientes de sus responsabilidades para con la sociedad y por lo general implantan métodos modernos de eliminación de desechos, aun cuando las reglamentaciones no los obliguen a ello.

Ciertos materiales de desperdicio pueden ser quemados, siempre que los productos de la combustión no contaminen la atmósfera circundante. Otros, tales como los desechos ácidos y alcalinos, pueden ser diluidos y neutralizados para luego ser descargados en una corriente en circulación. Todos estos desechos deben ser tratados y descargados de tal manera que sean innocuos para la vida de la corriente. Los operadores de plantas progresivas mantienen una cuidadosa verificación sobre el particular.

Los desechos inertes o los desechos insolubles o inmiscibles en agua pueden ser descargados en el sistema de drenaje superficial y separados en registros de asentamiento junto con otros contaminantes similares presentes en el agua del drenaje. Las corrientes de ácidos concentrados o de materiales en extremo peligrosos se descargan de preferencia en sistemas especiales de drenaje para ser eliminados en una planta de tratamiento por separado.

Desechos sanitarios

Los desechos sanitarios deben ser descargados en un sistema individual de drenaje y tratados en una planta de eliminación de drenajes sanitarios o en fosas sépticas. De ordinario, las fosas sépticas son satisfactorias para las plantas de tamaño moderado.

La fosa séptica es una cámara de retención en la cual los desechos sólidos se acumulan y luego son desintegrados por medio de bacterias. El efluente es un líquido claro que puede ser descargado en otro drenaje o en el sistema de drenaje superficial de la planta. De la fosa, los sólidos se remueven una vez al año.

En la Tabla 21-6 se resume el consumo de agua para varios accesorios de plomería. Esta información es necesaria para dar dimensiones apropiadas a las líneas de drenajes sanitarios.

Eliminación de desechos sólidos

Los desechos sólidos que no pueden ser quemados deben acarrearse a áreas especiales para ser enterrados, o remolcarse al mar

TABLA 21-6. CONSUMO DE AGUA POR DIVERSOS ACCESORIOS DE PLOMERIA

(Basado en una presión manométrica de agua de 15 a 20 lb/plg²)

Accesorio	Galones* consumidos cada vez que se usa
Inodoro	2.0–3.0
Mingitorio	0.5–0.75
Lavabo/cada llave	2.0–2.5
Regadera	2.0–3.0 (gpm)
Bebedero	0.5–0.75 (gal/día/persona)

* Un galón americano = 3.785 lt. (N. del T.)

en barcazas con fondo de volteo y ser descargados a muchos kilómetros de la costa.

En algunos casos, los sólidos pueden ser desintegrados por tratamiento químico, disueltos en agua y, después de una cuidadosa neutralización, descargados en el drenaje de la planta.

Aire para la planta

El uso, por parte de las plantas de proceso, del aire comprimido como fuente de energía para equipo portátil continúa en aumento. Para todos tipos de trabajo se diseñan herramientas accionadas por aire. Son sencillas de controlar y pueden ser utilizadas en áreas peligrosas.

Por lo tanto, en las plantas modernas generalmente se instala un sistema para servicio de aire. La tubería corre sobre rampas junto con la tubería de proceso y en todas las áreas requeridas se localizan ramales de la tubería principal. El aire comprimido puede distribuirse por toda la planta en un solo sistema o puede suministrarse en cada área mediante compresoras individuales.

El aire de servicio para la planta y el aire para instrumentos (Cap. 20) corren por sistemas separados. La presión manométrica del aire de servicio se mantiene de 100 a 125 lb/plg², mientras que la del aire para instrumentos no necesita exceder de 35 a 40 lb/plg². El aire de servicio para la planta algunas veces se utiliza, en emergencias, como aire para instrumentos aunque, en tales casos, primero debe pasar por el correspondiente secador.

Para las instalaciones de compresoras de aire se requieren los siguientes renglones habituales:

a. Compresora de aire: accionada con motor eléctrico o con vapor, de dos pasos, recíproca.

b. Filtro para la admisión de aire.

c. Agua de enfriamiento para las camisas de la compresora, interenfriador y postenfriador.
d. Depósitos de aire.
e. Control de presión.

En varios puntos del sistema se deben tomar las precauciones necesarias para eliminar la humedad condensada. Los depósitos de aire localizados en cada área de uso fuerte aumentarán el volumen del sistema y representan puntos de separación o condensación para la humedad. Esta puede ser separada manualmente o por medio de trampas. En climas húmedos se prefieren las trampas.

Para un sistema central de servicio de aire para la planta, la mejor localización para las compresoras es la adyacente a la planta generadora de fuerza y vapor. De esta manera, los operadores de la casa de fuerza pueden verificar periódicamente la operación de la compresora.

Seguridad en la planta

Las plantas de proceso se rodean con cercas rematadas con alambre de púas para impedir la entrada a visitantes no autorizados y a vagabundos. Decisiones legales que se han convertido en parte de las leyes comunes hacen responsables a los propietarios de las plantas por los daños ocasionados, dentro de los límites de una planta, a cualquier persona aun cuando su presencia no haya sido autorizada.

Las cercas se construyen con alambre de acero galvanizado y tienen de 7 a 10 pies (2 a 3 m) de altura. Los postes de las cercas son tramos de tubo de acero galvanizado anclados en concreto.

En cada puerta se localizan casetas de vigilancia y todo el personal de la planta y los visitantes deben pasar por una caseta de entrada. Los empleados deben tener tarjetas de identificación con una fotografía. Los visitantes deben portar gafetes especiales y ser acompañados por un empleado autorizado mientras dura la visita.

Si para la asistencia de empleados se emplean relojes marcadores, éstos se localizan en las casetas de entrada.

En cada caseta de entrada hay guardias uniformados que ejercen vigilancia sobre las personas y camiones que entran y salen de la planta. Otros guardias están asignados al servicio de patrulla nocturna.

Es preferible localizar los edificios de oficinas fuera del área de seguridad de la planta, en especial los edificios para las divisiones de ventas, ingeniería y personal. De esta forma, los visitantes pueden ser recibidos de manera apropiada, amistosa y en un ambiente agradable, condiciones que son difíciles de lograr en una caseta de entrada.

REFERENCIAS

1. Abbott, A. L., *National Electrical Code Handbook*, 7a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.
2. Babbitt, H. E., *Sewerage and Sewage Treatment*, 7a. Ed., John Wiley & Sons, New York, 1952.
3. Betz, W. H., y L. D. Betz, *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*, Philadelphia, Pa., 1950.
4. *Chem. Eng.*, *61*, Núm. 6, 122 (1954).
5. Cook, A. L., y C. C. Carr, *Elements of Electrical Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1954.
6. Croft, Terrell, *Steam Power Plant Auxiliaries and Accessories*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1946.
7. Cubberly, R., *Chem. Eng.*, *57*, Núm. 5, 140 (1950).
8. de Lorenzi, Otto, *Combustion Engineering*, Combustion Engineering-Superheater Co., Inc., New York, 1948.
9. Eliason, J. R., *Chem. Eng.*, *57*, Núm. 5, 129 (1950).
10. Erickson, William H., y N. H. Bryant, *Electrical Engineering—Theory and Practice*, John Wiley & Sons, New York, 1952.
11. Fair, G. M., y J. C. Geyer, *Water Supply and Waste-Water Disposal*, John Wiley & Sons, New York, 1954.
12. *Flow of Fluids*, Tech. Paper Núm. 409, Crane Co., Chicago, Ill., 1942.
13. *Fuel Oils*, 5a Ed,, Commercial Standard CS12-40, National Bureau of Standards, Supt. of Documents, Washington, D. C., 1940.
14. Gordon, D., *Chem. Eng.*, *57*, Núm. 5, 119 (1950).
15. *Guide for Tank Venting*, R. P. 2000 American Petroleum Institute, 50 West 50th St., New York, 1952.
16. Hart, W. B., *Industrial Waste Disposal for Petroleum Refineries and Allied Plants*, National Petroleum News Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1947.
17. Heuman, G. W., *Magnetic Control of Industrial Motors*, John Wiley & Sons, New York, 1954.
18. *Manual on Disposal of Refinery Wastes*, Vols. I, II, and III (Oil, Gas and Chemicals), American Petroleum Institute, New York, 1951-53.
19. Miller, C. E., *Mech. Eng.*, *73*, Núm. 1, 9 (1951).
20. Pender, H., *Electrical Engineer's Handbook—Electric Power Volume*, John Wiley & Sons, New York, 1949.
21. *Permutit Water Conditioning Data Book*, The Permutit Co., New York, 1953.
22. Powell, S. T., *Water Conditioning for Industry*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1954.
23. Ryan, W. J., *Water Treatment and Purification*, 2a. Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1946.
24. Salisbury, J. K., *Kent's Mechanical Engineer's Handbook—Power Volume*, 12a. Ed., John Wiley & Sons, New York, 1950.
25. Severns, W. H., H. E. Degler, y J. C. Miles, *Steam, Air and Gas Power*, 5a. Ed, John Wiley & Sons, New York, 1954.
26. Skrotzki, G. A. B., y W. A. Vopat, *Applied Energy Conversion*, McGraw-Hill Book, Co., New York, 1945.
27. *Storage, Handling and Use of Flammable Liquids*, NFPA Núm. 30-L, Págs. 30-15, National Fire Protection Association, Boston, Mass., 1954.

CAPITULO 22

CIMENTACIONES

Las cimentaciones para el equipo, los edificios y las estructuras de acero no solamente deben transmitir las cargas al suelo o al empilotado, sino también sujetar en su lugar al equipo soportado. Como dato práctico puede decirse que todas las cimentaciones se construyen de concreto simple o de concreto reforzado. Este material es relativamente barato y puede dársele cualquier forma mientras está plástico.

Para sujetar el equipo directamente en la cimentación, se dejan ahogados en el concreto pernos de anclaje cuando se cuela (Fig. 22-9). Después que ha fraguado, se sujeta el equipo en su lugar con los pernos. La mayor parte del equipo se atornilla firmemente, ya sea que esté colocado sobre un soporte de acero estructural que a su vez esté atornillado a una cimentación, o cuando el equipo se sujete directamente a la cimentación de concreto. Los tanques de gran diámetro, de fondo plano, por lo general no se atornillan, porque pueden colocarse directamente sobre losas de concreto o sobre una capa de suelo preparada, sin ninguna conexión.

En algunas instalaciones las máquinas pequeñas, bombas y transportadores ligeros, se apoyan colocando la base del equipo directamente sobre el piso de concreto terminado, en el que se hacen agujeros utilizando pernos de expansión que se dejan en el concreto.

TIPOS DE CIMENTACION

Los tipos de cimentación que más se usan en las plantas de proceso son los de zapatas, las cimentaciones flotantes, las masivas y las de pilotes. Esta lista no constituye un sistema o clasificación, pero se presta para hacer las subdivisiones en la discusión que se da en seguida.

Zapatas

Si las condiciones del suelo son favorables, la zapata, que es el tipo de cimentación más antiguo, es el menos costoso. Diciéndolo en forma sencilla: las zapatas que se usan en las industrias de proceso consisten en una columna o pedestal colada monolíticamente con una base de sección mucho mayor (la zapata) como se muestra en la Fig. 22-1. La porción ampliada, si se proyecta correctamente, transmite la carga que recibe al suelo. Cuanto mayor sea la base de la cimentación menor será la presión unitaria en el suelo.

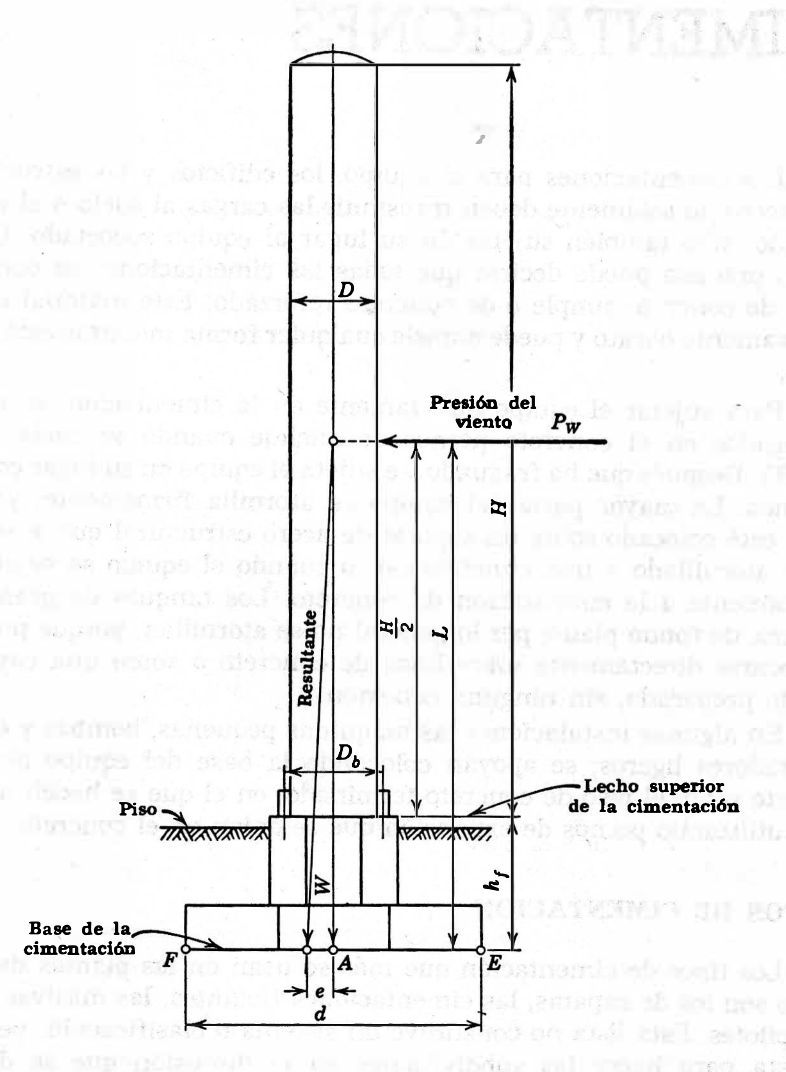


FIG. 22-1. Zapata para una torre. [Reproducción autorizada, de V. O. Marshall, *Petroleum Refiner*, 22, Núm. 8, 101 (1943).]

Las zapatas se construyen generalmente de concreto reforzado. La profundidad ideal para desplantar las bases es la que no sea menor que la profundidad de congelación normal ni que la máxima a la que se noten cambios volumétricos de expansión o de contracción, debiéndose tomar la que sea mayor. Sin embargo, en muchos suelos arcillosos la profundidad puede ser tan grande, que resultaría muy costosa la excavación. En estos casos se recurre a otros tipos de cimentación que pueden ser los indicados.

Las zapatas se usan con mayor frecuencia para soportar torres (Fig. 22-1), chimeneas y columnas estructurales altas. En estas aplicaciones la zapata circular es la ideal. Las estructuras altas sujetan

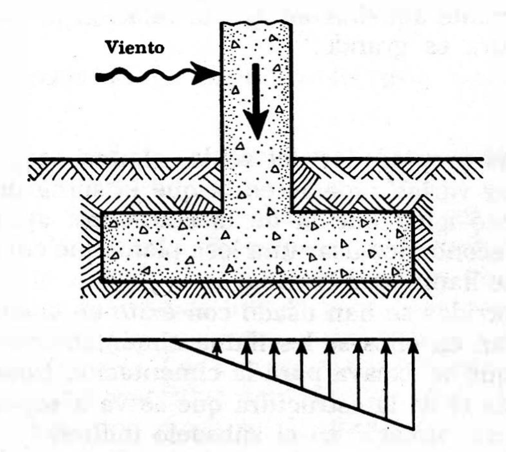


Fig. 22-2. Distribución de la presión en el suelo debajo de una zapata sujeta a la carga producida por el viento.

la zapata a la acción combinada y simultánea del peso y el momento de vuelco producido por los terremotos y el viento. Las presiones que no se equilibran, pueden, en algunos casos, producir zonas en las que el empuje hacia arriba entre el suelo y la zapata sea cero (véase la Fig. 22-2). En estas condiciones la tendencia a agrietarse es muy grande. Debido a las esquinas, las zapatas de forma cuadrada y rectangular se agrietan con más facilidad que las circulares. Como debido al viento existe la posibilidad de que el momento de vuelco se produzca en cualquier dirección, la forma circular tiene la ventaja adicional de dar la misma distribución a los esfuerzos, cualquiera que sea la dirección del momento de vuelco.

La construcción de los moldes y la colocación del refuerzo siempre han resultado más costosas para las zapatas circulares que para las de costados rectos. Las hileras paralelas del acero de refuerzo deben cortarse de diferentes longitudes. Es posible colocar acero de una misma longitud hasta el centro, pero cerca de él requiere demasiado espacio. Por tanto, se han usado mucho las formas octagonales para estructuras como las torres altas con cimiento propio. El volumen de

concreto que se necesita en las zapatas octagonales es ligeramente mayor y pueden colocarse varillas de refuerzo de igual longitud perpendiculares a los lados.

Al perfeccionarse las técnicas para construir moldes, pueden cambiar los costos. Por ejemplo, puede resultar más barato construir moldes circulares estándar para cimientos de torres de varios tamaños.

Por ser de construcción más sencilla, los moldes para las zapatas cuadradas siguen siendo el tipo que se usa con mayor frecuencia. Si el momento de vuelco es pequeño o insignificante, el proyecto es sencillo. Las zapatas cuadradas se usan para soportar equipo y estructuras, especialmente aquellas en que la relación de la sección transversal a la altura es grande.

Losa corrida

Debido a las propiedades del suelo, algunos equipos y edificios pueden necesitar varias zapatas en la que la suma de sus áreas sea aproximadamente igual que la de la estructura apoyada. En estos casos resultará económico usar una losa plana que cubra toda el área. A esta losa se le llama losa corrida.

Las losas corridas se han usado con éxito en suelos compresibles y cuando se usan en ellos se les llama cimentaciones "flotantes". El peso del suelo que se excava para la cimentación flotante es igual al peso de ésta más el de la estructura que se va a soportar. Por tanto, toda la estructura "flotará" en el subsuelo inalterado.

Algunas veces se usan las cimentaciones flotantes para soportar tanques de almacenamiento. La cimentación corrida más sencilla para grandes tanques de almacenamiento con fondo plano que no requieren anclaje es una cama de arena de 10 cm de espesor. La porción de la cama de arena que sobresale del tanque se le llama berma y debe tener una anchura de 1.50 m. Generalmente se protege de la intemperie con una cubierta asfáltica. El suelo que la rodea debe conformarse y prepararse para que tenga buen drenaje.

Quizá el tipo más popular de estas cimentaciones para tanques grandes de almacenamiento es el que emplea un muro de concreto de una anchura mínima de 20 cm. Las paredes del tanque se apoyan en este muro de concreto reforzado que debe tener una profundidad mayor que la de congelación. La capa de arena de 10 cm que se coloca dentro del muro proporciona un apoyo adicional (Fig. 22-3).

Cimentaciones de gran masa

La maquinaria como los compresores de pistón, las centrífugas y otros equipos semejantes que están en movimiento, deben apoyarse de manera que la vibración y las fuerzas de inercia no balanceadas se amortigüen. Se han inventado muchos métodos ingeniosos para

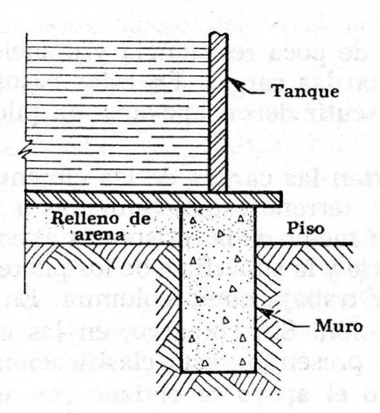


FIG. 22-3. Construcción de un muro circular para tanque de almacenamiento.

lograr el amortiguamiento. Pueden comprarse varios aisladores para las vibraciones, o amortiguadores que emplean materiales absorbentes o resortes. Sin embargo, siempre que sea posible, en las plantas de proceso se usarán cimentaciones de gran peso, a las que deberá anclarse la maquinaria firmemente. Las cimentaciones pesadas equilibran las fuerzas de inercia periódicas producidas por las máquinas de movimiento recíproco, porque la aceleración es máxima al final de la carrera. Las vibraciones producidas por las máquinas que giran a gran velocidad también las absorben las cimentaciones cuando tienen una masa suficientemente grande.

En la Fig. 22-4 se muestra una cimentación de gran peso típica. Si van a colocarse juntas varias máquinas, como compresores, en un cuarto o cámara de compresores, puede obtenerse la ventaja de una masa efectiva mayor uniendo los bloques separados de los compresores, de manera que formen una masa monolítica común.

Cimentaciones de pilotes

Con frecuencia se han localizado las plantas de proceso ventajosamente en zonas costeras o a lo largo de los ríos. Estos lugares, aunque muy convenientes para la economía del transporte, general-

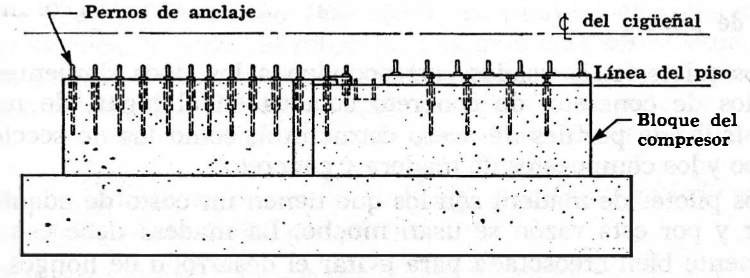


FIG. 22-4. Cimentación de gran masa para compresor.

concreto que se necesita en las zapatas octagonales es ligeramente mayor y pueden colocarse varillas de refuerzo de igual longitud perpendiculares a los lados.

Al perfeccionarse las técnicas para construir moldes, pueden cambiar los costos. Por ejemplo, puede resultar más barato construir moldes circulares estándar para cimientos de torres de varios tamaños.

Por ser de construcción más sencilla, los moldes para las zapatas cuadradas siguen siendo el tipo que se usa con mayor frecuencia. Si el momento de vuelco es pequeño o insignificante, el proyecto es sencillo. Las zapatas cuadradas se usan para soportar equipo y estructuras, especialmente aquellas en que la relación de la sección transversal a la altura es grande.

Losa corrida

Debido a las propiedades del suelo, algunos equipos y edificios pueden necesitar varias zapatas en la que la suma de sus áreas sea aproximadamente igual que la de la estructura apoyada. En estos casos resultará económico usar una losa plana que cubra toda el área. A esta losa se le llama losa corrida.

Las losas corridas se han usado con éxito en suelos compresibles y cuando se usan en ellos se les llama cimentaciones "flotantes". El peso del suelo que se excava para la cimentación flotante es igual al peso de ésta más el de la estructura que se va a soportar. Por tanto, toda la estructura "flotará" en el subsuelo inalterado.

Algunas veces se usan las cimentaciones flotantes para soportar tanques de almacenamiento. La cimentación corrida más sencilla para grandes tanques de almacenamiento con fondo plano que no requieren anclaje es una cama de arena de 10 cm de espesor. La porción de la cama de arena que sobresale del tanque se le llama berma y debe tener una anchura de 1.50 m. Generalmente se protege de la intemperie con una cubierta asfáltica. El suelo que la rodea debe conformarse y prepararse para que tenga buen drenaje.

Quizá el tipo más popular de estas cimentaciones para tanques grandes de almacenamiento es el que emplea un muro de concreto de una anchura mínima de 20 cm. Las paredes del tanque se apoyan en este muro de concreto reforzado que debe tener una profundidad mayor que la de congelación. La capa de arena de 10 cm que se coloca dentro del muro proporciona un apoyo adicional (Fig. 22-3).

Cimentaciones de gran masa

La maquinaria como los compresores de pistón, las centrífugas y otros equipos semejantes que están en movimiento, deben apoyarse de manera que la vibración y las fuerzas de inercia no balanceadas se amortigüen. Se han inventado muchos métodos ingeniosos para

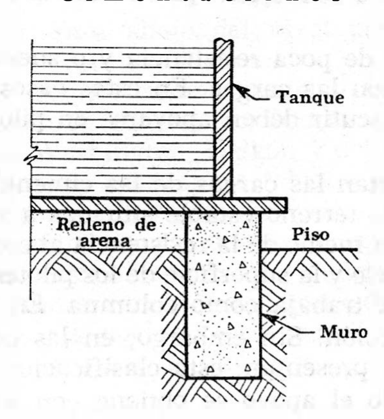


FIG. 22-3. Construcción de un muro circular para tanque de almacenamiento.

lograr el amortiguamiento. Pueden comprarse varios aisladores para las vibraciones, o amortiguadores que emplean materiales absorbentes o resortes. Sin embargo, siempre que sea posible, en las plantas de proceso se usarán cimentaciones de gran peso, a las que deberá anclarse la maquinaria firmemente. Las cimentaciones pesadas equilibran las fuerzas de inercia periódicas producidas por las máquinas de movimiento recíproco, porque la aceleración es máxima al final de la carrera. Las vibraciones producidas por las máquinas que giran a gran velocidad también las absorben las cimentaciones cuando tienen una masa suficientemente grande.

En la Fig. 22-4 se muestra una cimentación de gran peso típica. Si van a colocarse juntas varias máquinas, como compresores, en un cuarto o cámara de compresores, puede obtenerse la ventaja de una masa efectiva mayor uniendo los bloques separados de los compresores, de manera que formen una masa monolítica común.

Cimentaciones de pilotes

Con frecuencia se han localizado las plantas de proceso ventajosamente en zonas costeras o a lo largo de los ríos. Estos lugares, aunque muy convenientes para la economía del transporte, general-

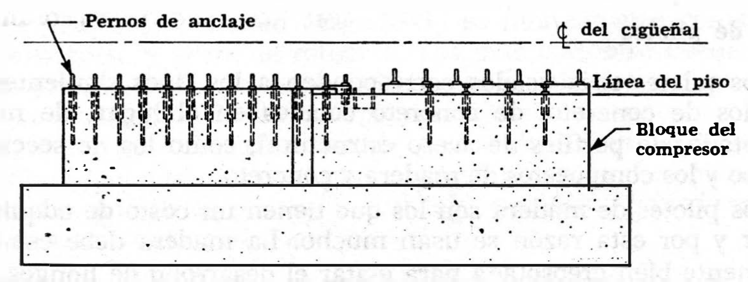


FIG. 22-4. Cimentación de gran masa para compresor.

mente tienen suelos de poca resistencia y/o suelos que sufren grandes asentamientos con las cargas. En estos casos, las cimentaciones que se acaban de discutir deben apoyarse en pilotes, como se muestra en la Fig. 22-5.

Los pilotes soportan las cargas de las cimentaciones y las transmiten a las capas de terreno estable situadas a varios metros abajo de la superficie, o por medio de la resistencia al corte creada por el rozamiento entre el suelo y la superficie de los pilotes. En el primer caso se dice que el pilote trabaja como columna. En el segundo se dice que trabaja por fricción. Sin embargo, en las condiciones que con mayor frecuencia se presentan, esta clasificación sencilla resulta inadecuada. A menudo el apoyo se obtiene con una combinación de ambos efectos.

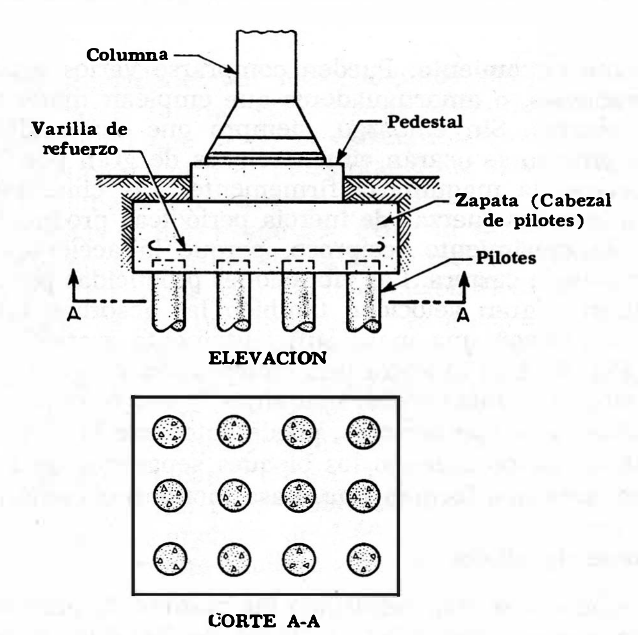


Fig. 22-5. Pilotes soportando una columna de acero estructural.

Tipos de pilotes

Los pilotes más usados corresponden a los tipos siguientes: fabricados de concreto, de concreto colados en el lugar, de madera creosotada, de perfiles de acero estructural, como los de sección H, de tubo y los compuestos de madera y concreto.

Los pilotes de madera son los que tienen un costo de adquisición menor y por esta razón se usan mucho. La madera debe estar perfectamente bien creosotada para evitar el desarrollo de hongos. Para evitar posteriormente la pudrición de la cabeza de los pilotes de ma-

dera, deberán quedar éstos abajo del nivel permanente del agua subterránea.

Debido a las limitaciones en la resistencia de los pilotes de madera, se usan mejor cuando trabajan por fricción que como columnas.

En los bosques de Washington, Oregón y del norte de California, puede encontrarse materia prima para fabricar pilotes con una longitud hasta de 27 m, pero cada vez escasea más. Por tanto, los pilotes de concreto se usan con mayor frecuencia en las plantas de proceso.

El concreto no se pudre ni se corroe* y cuando está reforzado, es capaz de soportar grandes cargas. Los pilotes de concreto se fabrican antes de hincarlos o se cuelan en el lugar. Los producen las mismas compañías que se encargan de hincarlos.

Pilotes de Concreto Colados en el Lugar

Los pilotes colados en el lugar se hacen hincando una vaina de lámina de acero corrugada o estriada en la tierra hasta la profundidad necesaria. Para reforzar la lámina delgada se coloca dentro un núcleo o eje antes de hincarlo en la tierra. Luego se quita el núcleo y se llena el hueco de concreto. Existen varios tipos de pilotes patentados, algunos de ellos son cónicos (Fig. 22-6). Se prefieren los pilotes cónicos para suelos que tienen una elevada fricción, como la arena, porque en este tipo de suelo desarrollan resistencias al corte mayores que los pilotes de costados paralelos.

Pilotes de Concreto y Tubo

Los pilotes de tubo se usan principalmente cuando van a trabajar como columnas. Cuando se cuelan algunos tipos se saca el tubo al mismo tiempo que se empuja el concreto hacia abajo. Puede formarse un bulbo o pedestal en el pie del pilote para aumentar el área de apoyo. Lo que se puede hacer aplicando una gran fuerza cuando se han colado los primeros metros de concreto.

Pilotes de Concreto Fabricados

Los pilotes de concreto (Fig. 22-6) se fabrican con concreto de alta resistencia y acero de refuerzo. Los más cortos se pueden obtener de forma cónica. Se usan en los casos en los que los colados en el lugar resultarían de difícil aplicación, como cuando van a quedar bajo el agua. Además, son de gran valor en las instalaciones en las que hay que cargar el pilote inmediatamente. Los pilotes presforzados se usan en plantas industriales pesadas, de modo especial si la estructura es también de concreto.

* El agua de mar ataca el concreto en o cerca de la superficie.

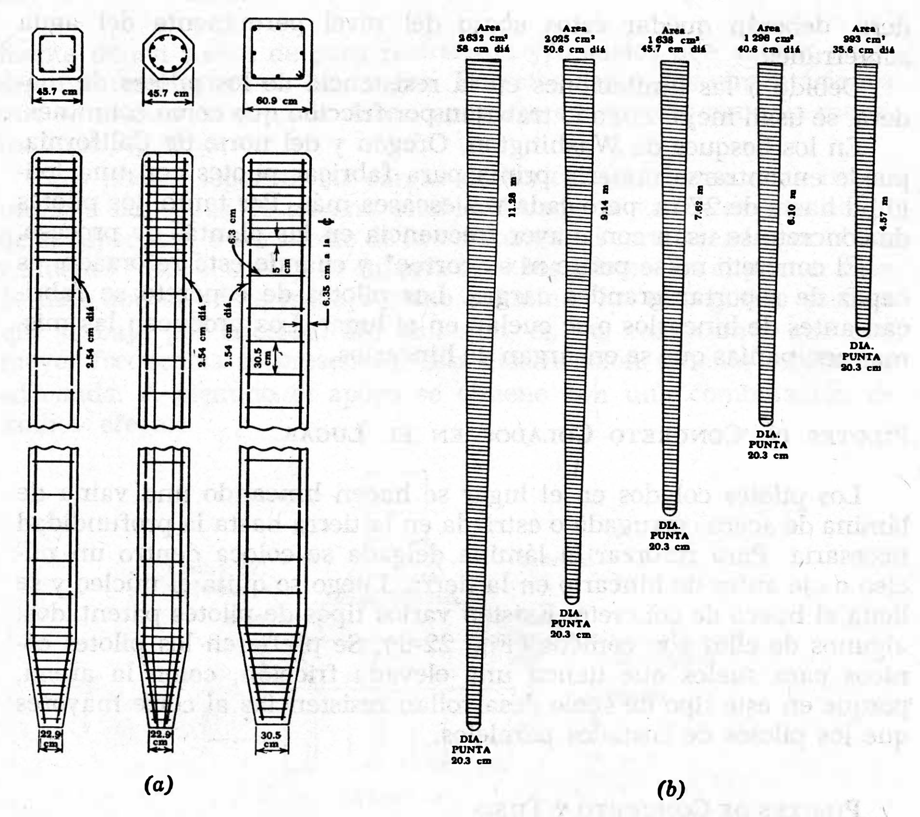


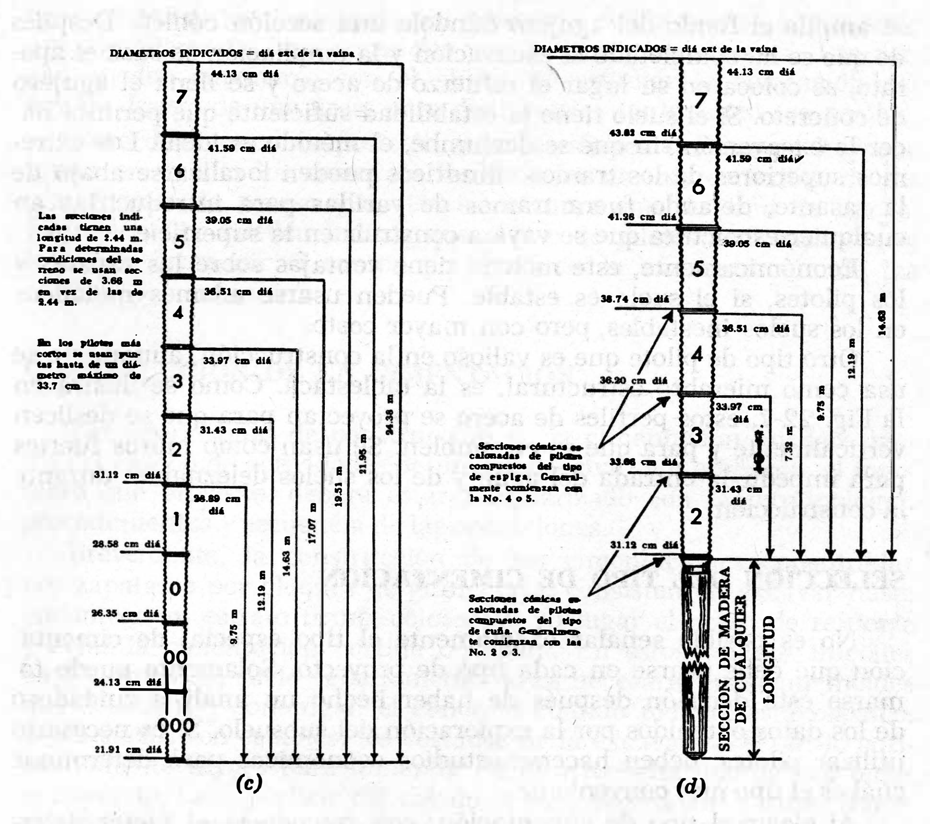
Fig. 22-6. Pilotes típicos: (*a*) Pilotes fabricados; (*b*) pilotes de concreto colocados en el lugar; (*c*) pilotes cónicos de acero; (*d*) de madera compuestos. (Cortesía de Raymond Concrete Pile Company.)

Perfiles de Acero Estructural Usados como Pilotes

Algunas veces es necesario usar un pilote muy resistente que pueda penetrar fácilmente en el suelo más denso. Los perfiles de acero estructural, aunque costosos, satisfacen esos requisitos y se usan para piloteados difíciles que requieren grandes longitudes y fuerzas para hincar los pilotes que romperían materiales más débiles.

Pilotes Combinados

En algunas instalaciones que requieren pilotes largos es posible combinar las ventajas del bajo costo de la madera con las cualidades antiputrescibles del concreto. Se hinca primero el pilote de madera siguiéndolo con un tramo de pilote cónico colado en el lugar. Se usan varios tipos de uniones para asegurar una conexión firme entre el



concreto y la madera con la que se excluya al agua y se evite la flexión.

Pilotes Inclinados

Los compresores y otras máquinas pesadas en movimiento producen fuerzas horizontales. Si la cimentación debe apoyarse en pilotes, es necesario hincar cuando menos algunos de ellos inclinados para que resistan las fuerzas horizontales. Los pilotes hincados de esta manera pueden ser de cualquiera de los tipos mencionados anteriormente.

Pilotes de Varios Tipos

Un sistema nuevo de construcción de cimentaciones que se está usando satisfactoriamente combina las características de los pilotes, de las zapatas y de las columnas de concreto reforzado. El método consiste en excavar un agujero hasta la profundidad deseada, luego

se amplía el fondo del agujero dándole una sección cónica. Después de que se ha completado la excavación y la ampliación se saca el aparato, se coloca en su lugar el refuerzo de acero y se llena el agujero de concreto. Si el suelo tiene la estabilidad suficiente que permita hacer la excavación sin que se derrumbe, el método es ideal. Los extremos superiores de los tramos cilíndricos pueden localizarse abajo de la rasante, dejando fuera tramos de varillas para introducirlas en cualquier estructura que se vaya a construir en la superficie.

Económicamente, este método tiene ventajas sobre las zapatas y los pilotes, si el suelo es estable. Pueden usarse ademes metálicos en los suelos inestables, pero con mayor costo.

Otro tipo de pilote que es valioso en la construcción, aunque no se usa como miembro estructural, es la tablestaca. Como se ilustra en la Fig. 22-7, estos perfiles de acero se proyectan para que se deslicen verticalmente y para que se ensamblen. Se usan como muros fuertes para impedir la entrada del agua y de los suelos deleznables durante la construcción.

SELECCION DEL TIPO DE CIMENTACION

No es posible señalar exactamente el tipo especial de cimentación que debe usarse en cada tipo de proyecto. Solamente puede tomarse esta decisión después de haber hecho un análisis cuidadoso de los datos obtenidos por la exploración del subsuelo. Si es necesario utilizar pilotes, deben hacerse estudios económicos para determinar cuál es el tipo más conveniente.

Al elegir el tipo de cimentación, con frecuencia el factor determinante es la distribución del equipo en una área determinada que satisfaga las condiciones del proceso. Si se conocen las características de carga del suelo, pueden hacerse cálculos aproximados del

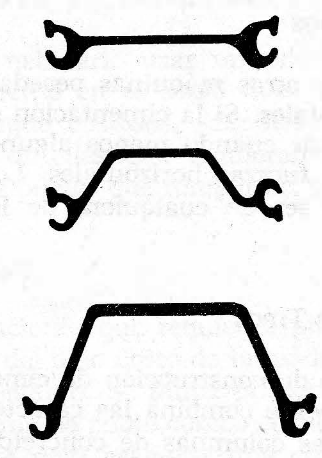


FIG. 22-7. Secciones típicas de tablestacas de acero.

área necesaria en las zapatas al principio del proyecto, suponiendo aproximadamente las cargas que van a obrar en cada área. Las cargas pueden suponerse con el objeto de estudiar la colocación del equipo dentro de una área, para distribuirlas tanto como sea posible.

Para determinar la posición más económica del equipo hay que tomar en cuenta los costos de las tuberías de interconexión, de las plataformas de acceso y de las estructuras que servirán de apoyo. Estos estudios pueden indicar que el uso de pilotes será menos costoso que distribuir el equipo para reducir la concentración de las cargas.

CONSTRUCCION DE LA CIMENTACION

Las operaciones de construcción de la cimentación quedan dentro del campo de actividades del ingeniero civil. Sin embargo, el ingeniero que proyecte, deberá estar familiarizado con la terminología, procedimientos y secuencia de las operaciones.

Brevemente, la construcción de las cimentaciones constituidas por zapatas o por bloques de gran masa, consisten en excavar hasta encontrar un estrato firme, colocar en su lugar el acero de refuerzo y colar la cimentación corrida o zapata. En estos colados iniciales bajo el nivel del suelo generalmente no es necesario construir moldes que confinen y contengan el concreto cuando todavía está plástico. Si los suelos son estables, los costados de la excavación serán lo suficientemente firmes para tomar la forma necesaria que deberá tener el concreto. La superficie del colado se deja áspera con varillas sobresaliendo del concreto, de manera que, si es necesario hacer colados adicionales para completar la estructura se adhieran con seguridad.

La carga que va a soportar un grupo de pilotes se distribuye a cada uno de ellos por medio de un cabezal de concreto reforzado, que se cuela cubriendo la cabeza de los pilotes. Este tipo de cimentación se construye haciendo una excavación con la profundidad que debe tener el cabezal; se hincan luego los pilotes, cortándoles la cabeza al mismo nivel, si son de madera. Después se coloca el refuerzo de acero del cabezal y se cuela el bloque de concreto que lo forma.

Programa de los trabajos de cimentación

El programa de construcción ideal es aquel en el que todas las operaciones que hay que efectuar abajo del nivel del suelo se completan antes de empezar las que se van a efectuar arriba del mismo. La continuación de trabajos subterráneos después que se ha montado el equipo que va arriba del suelo es extremadamente costosa. Por ejemplo, abrir una zanja a través de una área de construcción constituye un riesgo e impedimentos serios en la operación. Las excavaciones posteriores en una zona congestionada tienen que hacerse casi

siempre a mano, disminuyéndose la velocidad de los trabajos en la superficie, por la interferencia.

La entrega de los proyectos de las cimentaciones al personal de montaje debe coordinarse con la entrega de todos los proyectos subterráneos como tuberías, conexiones a tierra y ductos eléctricos.

Estudio del subsuelo

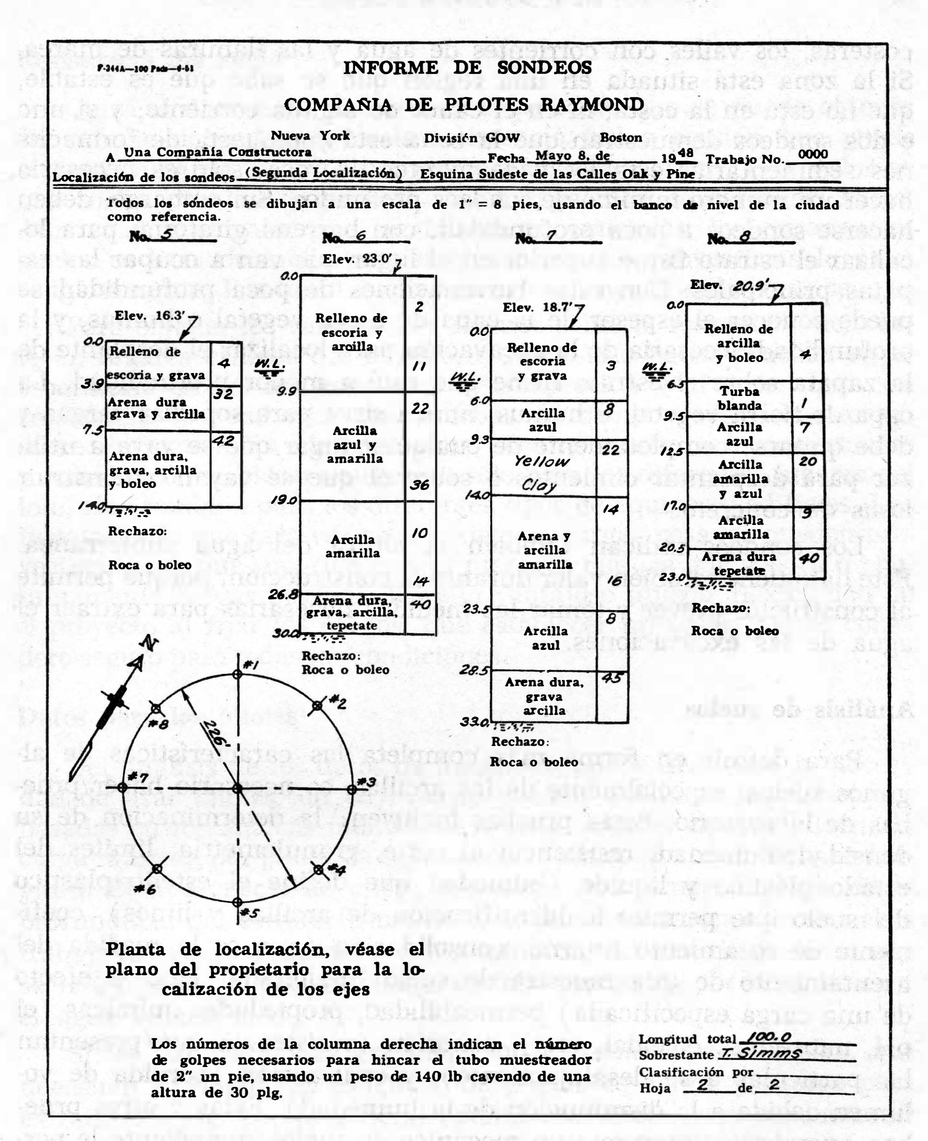
En las primeras etapas del proyecto se determinarán las características de resistencia del suelo en el que se va a construir la planta. En realidad, estas características deben conocerse antes de comprar el terreno. Es imposible juzgar las condiciones del subsuelo a simple vista, y generalmente resulta económico emplear los servicios de empresas especializadas en el análisis de suelos o en estudios del subsuelo. La seguridad en los datos permite proyectar y elegir la cimentación sobre bases reales.

Además de las características generales del subsuelo, deben hacerse estudios más extensos en los lugares precisos donde va a colocarse cada una de las zapatas.

Sondeos

El método más seguro para determinar las características del subsuelo es extraer muestras de cada estrato por medio de sondeos, los cuales se pueden dividir en sondeos principales o profundos, con los que se localizan los estratos importantes, y los secundarios o de poca profundidad, que deberán hacerse debajo de cada zapata. Algunas veces se pueden utilizar los registros de perforación de los pozos de agua profundos para determinar la profundidad práctica de los sondeos principales. Generalmente, los registros de perforación de los pozos de agua proporcionan datos detallados porque en ellos deben estar localizadas todas las capas de arena que tienen agua.

Los sondeos principales se hacen con máquinas portátiles montadas en camiones. Deberá dárseles una profundidad de 30 a 60 m, o mayor, si es necesario. En uno de los métodos que se emplea mucho, se utiliza una barrena de cola de pescado a la que se aplican movimientos verticales largos. Con el agua de lavado se extrae el material suelto como en la mayor parte de los sistemas de barrenación. Cada vez que se nota un cambio en los materiales extraídos, se cambia la barrena por una cuchara para muestras que se hinca en el terreno que todavía no se ha perforado. Las muestras secas obtenidas de esta manera se guardan en recipientes cerrados herméticamente, marcados con mucho cuidado para estudiarse en el laboratorio. Anotando el número de golpes dados con fuerza uniforme para hincar la cuchara muestreadora en cada tramo del estrato, se conoce la compacidad del suelo. En la Fig. 22-8 se muestra un informe típico de un estudio de subsuelo.


F-344A—100 Pads—6-61

INFORME DE SONDEOS

COMPAÑIA DE PILOTES RAYMOND

Nueva York División GOW Boston

A Una Compañía Constructora Fecha Mayo 8, de 1948 Trabajo No. 0000

Localización de los sondeos (Segunda Localización) Esquina Sudeste de las Calles Oak y Pine

Todos los sondeos se dibujan a una escala de 1" = 8 pies, usando el banco de nivel de la ciudad como referencia.

No. 5 — Elev. 16.3'

Prof.	Material	Golpes
0.0	Relleno de escoria y grava	4
3.9	Arena dura grava y arcilla	32
7.5	Arena dura, grava, arcilla y boleo	42
14.0	Rechazo: Roca o boleo	

No. 6 — Elev. 23.0'

Prof.	Material	Golpes
0.0	Relleno de escoria y arcilla	2, 11
9.9	Arcilla azul y amarilla	22, 36
19.0	Arcilla amarilla	10, 14
26.8	Arena dura, grava, arcilla, tepetate	40
30.0	Rechazo: Roca o boleo	

No. 7 — Elev. 18.7'

Prof.	Material	Golpes
0.0	Relleno de escoria y grava	3
6.0	Arcilla azul	8
9.3	Yellow Clay	22
14.0	Arena y arcilla amarilla	14, 16
23.5	Arcilla azul	8
28.5	Arena dura, grava arcilla	45
33.0	Rechazo: Roca o boleo	

No. 8 — Elev. 20.9'

Prof.	Material	Golpes
0.0	Relleno de arcilla y boleo	4
6.5	Turba blanda	1
9.5	Arcilla azul	7
12.5	Arcilla amarilla y azul	20
17.0	Arcilla amarilla	9
20.5	Arena dura tepetate	40
23.0	Rechazo: Roca o boleo	

Planta de localización, véase el plano del propietario para la localización de los ejes

Los números de la columna derecha indican el número de golpes necesarios para hincar el tubo muestreador de 2" un pie, usando un peso de 140 lb cayendo de una altura de 30 plg.

Longitud total 100.0
Sobrestante T. Simms
Clasificación por
Hoja 2 de 2

FIG. 22-8. Informe de sondeos. (Cortesía de Raymond Concrete Pile Company.)

Los sondeos deben suspenderse cuando se llega a la roca (que se anota como "rechazo" en la Fig. 22-8). La magnitud y propiedades de esta roca o manto de roca pueden determinarse extrayendo "corazones", con equipos de barrenación especiales, giratorios, semejantes a los que se usan en la perforación en la industria petrolera.

Es absolutamente indispensable hacer gran número de sondeos en las zonas que alguna vez estuvieron cubiertas de agua, como las

costeras, los valles con corrientes de agua y las llanuras de marea. Si la zona está situada en una región que se sabe que es estable, que no está en la costa, ni en el cauce de alguna corriente; y si uno o dos sondeos demuestran que la zona está compuesta de formaciones sedimentarias estables o de mantos de roca, sólo es necesario hacer un número mínimo de sondeos profundos. Sin embargo, deben hacerse sondeos a poca profundidad, con barrena giratoria, para localizar el estrato firme superior en el lugar que van a ocupar las zapatas principales. Con estas barrenaciones de poca profundidad se puede conocer el espesor de la capa de tierra vegetal o humus, y la profundidad necesaria de la excavación para localizar el desplante de la zapata sobre el estrato firme que esté a menor profundidad. La capa de tierra vegetal, o humus, nunca sirve para soportar cargas y debe quitarse completamente de cualquier lugar que se vaya a utilizar para desplantar cimientos o sobre el que se vayan a construir losas de concreto.

Los sondeos indican también la altura del agua subterránea. Este dato tiene también valor durante la construcción, porque permite al constructor prever y tomar las medidas necesarias para extraer el agua de las excavaciones.

Análisis de suelos

Para definir en forma más completa las características de algunos suelos, especialmente de las arcillas, es necesario hacer pruebas de laboratorio. Estas pruebas incluyen: la determinación de su densidad, humedad, resistencia al corte, granulometría, límites del estado plástico y líquido (humedad que define el estado plástico del suelo que permite la identificación de arcillas y limos), coeficiente de rozamiento interno, consolidación (que es la medida del asentamiento de una muestra de suelo "inalterada" bajo el efecto de una carga especificada) permeabilidad, propiedades químicas (el pH, naturaleza coloidal, etc.), cohesión (resistencia que presentan las partículas a su desalojamiento), y contracción (pérdida de volumen debida a la disminución de la humedad). Estas y otras pruebas, cuando las interpreta un mecánico de suelos competente le permiten hacer predicciones seguras sobre las cualidades del suelo para el proyecto.

Es posible dibujar cortes del subsuelo basándose en estos datos y en los obtenidos en los sondeos. Como es imposible hacer un número infinito de sondeos, es necesario tener un buen criterio para predecir la extensión de cada formación y de los estratos entre sondeos. Todos los ingenieros que utilicen estos cortes de suelos deben recordar las limitaciones con que se hace su interpretación. No se puede garantizar ningún corte.

Resistencia del suelo

Quizá el dato cuantitativo más importante que se puede obtener del estudio del subsuelo es la resistencia útil o presión que puede soportar el suelo en kilos por cm^2 o toneladas por m^2. Este valor se usa en los cálculos de proyecto como capacidad de carga del suelo. Aun cuando el valor que finalmente recomiendan los expertos en suelos se basa de modo parcial en teorías, los proyectistas lo usan religiosamente. Por tanto, es imperativo obtener el valor más seguro.

Para obtener los valores más seguros sobre la resistencia del suelo en lugares críticos del terreno, es necesario hacer pruebas en el laboratorio de las resistencias a la compresión y al corte, que con frecuencia se combinan con pruebas de campo (véase la sección sobre Proyecto). En algunos casos, resulta mucho más conveniente y económico establecer valores no sólo para los diferentes lugares del lote, sino también para los diferentes tipos de equipos y edificios. Las instalaciones que rara vez están sujetas a cargas pesadas pueden proyectarse para que soporten cargas menores que las que soportan continuamente cargas pesadas. Resulta ventajoso utilizar flexibilidad en el proyecto al fijar las cargas, que establecer un valor que se considere seguro para todas las condiciones.

Datos para los pilotes

Del análisis de los datos de los suelos puede deducirse la necesidad de usar pilotes, en cuyo caso, pueden utilizarse las decisiones basadas en los análisis mencionados para saber el tipo de pilotes, la carga máxima por pilote, la separación mínima entre pilotes y su longitud. El tipo exacto de pilote que tenga que usarse depende de la profundidad del estrato firme, de si el pilote va a soportar su carga trabajando por rozamiento o como columna, del tipo de suelo en que se va a hincar, y de la posibilidad de falla producida por el suelo o por el agua subterránea.

Si las características del suelo son extremadamente malas, que necesiten el empleo de ataguías, de pilotes de carga, y equipo para extraer el agua, por lo general resulta más económico subcontratar todo el trabajo de cimentación, incluyendo el estudio del subsuelo. Para estas operaciones se requiere personal especializado, así como equipo especial que resulta costoso rentar.

Los problemas de cimentación son generalmente diferentes en cada localidad, variando con el tipo de planta, geología del lugar y con las concentraciones de carga en la planta. Los estudios completos y análisis de la estratigrafía deberán hacerlos especialistas competentes en esos estudios. Para este trabajo deben preferirse empresas locales, porque la experiencia local es un factor importante para obtener datos y conclusiones seguras.

Localización de linderos

La primera operación para proyectar la distribución de la planta es obtener la localización exacta de la propiedad o de los linderos, referencias y elevaciones, que pueden localizarse de los monumentos de las propiedades adyacentes, de los caminos locales, ferrocarriles y otras marcas permanentes mensurables, identificables en el campo y registradas legalmente. Se le puede pedir al contratista principal que ejecute este trabajo para el propietario, o el propietario puede contratar con una firma local que haga trabajos de ingeniería para que compruebe registros e identifique los linderos. Al mismo tiempo que se ejecuta este trabajo, se determinan las elevaciones del terreno y se preparan planos con líneas de nivel.

Los trabajos adicionales de construcción que se ejecutan en plantas ya construidas no requerirán una comprobación tan extensa, pero los puntos de referencia para las elevaciones y linderos definidos en el lugar donde se va a efectuar el trabajo deberán aparecer en los dibujos (que generalmente es el plano de un lote) y registrados en libretas de campo. Deberán estar claramente definidos los linderos de la obra, porque pueden surgir en ciertas condiciones del trabajo disputas respecto a jurisdicción, entre los representantes sindicales del personal del propietario y los que representan al personal contratista.

Para localizar las diferentes instalaciones de la planta, el plano de distribución general (véase el Cap. 6, Fig. 6-1) en el que aparecen todas las áreas, generalmente se secciona con líneas imaginarias horizontales y verticales, numeradas a partir de un cero arbitrario y localizadas a intervalos regulares a 25, 50, o 100 m, según el tamaño de la obra. A estos ejes se les puede llamar *X* y *Y* o norte y este. De esta manera se identifican con facilidad los puntos principales, como las esquinas de los edificios o una esquina de una área determinada llamando al punto por sus coordenadas, por ejemplo: si la distancia entre ejes es de 25 m, un punto que tuviera las siguientes coordenadas 5 + 12.50 Este y 4 + 16.00 Norte, estaría situado a $5 \times 25 + 12.50 = 137.50$ m al este y $4 \times 25 + 16.00 = 116.00$ m al norte del origen. Debe usarse un sistema consistente como éste en los proyectos, porque une específicamente puntos determinados al origen.

Deberán establecerse cuando menos dos puntos de referencia de manera que se puedan comprobar fácilmente las dimensiones. Estos puntos o monumentos deberán colocarse fuera del área de trabajo, y deberán construirse de manera que no se muevan con facilidad. Un monumento sencillo puede consistir en un pedazo de tubo de acero con una longitud de 1.0 a 1.8 m, colocado verticalmente en un revestimiento de concreto de sección cuadrada de 45 a 60 cm de lado, sobresaliendo la porción superior del suelo de 15 a 30 cm. El tubo del monumento se coloca de manera que el punto de referencia quede dentro de su diámetro. Luego se coloca un pedazo de flecha de latón de 5 cm de diámetro y de 45 cm de largo tan cerca del centro como

sea posible, sobresaliendo unos cuantos centímetros del tubo. En seguida se llena el tubo de concreto. Después de que ha fraguado el concreto se marca el punto exacto con un punzón en la flecha de latón, usando una plomada y un tránsito. Para hacer el monumento más permanente se puede hacer rosca a la porción superior de la flecha y ponerle una tapa de latón que cubra su extremo superior. La tapa es también muy conveniente cuando el monumento se va a usar como banco de nivel.

La colocación de un norte arbitrario en la planta es igualmente tan importante como las referencias de dimensión y elevación. Una vez que se ha colocado el norte de la planta, se pueden hacer distribuciones en ángulo recto en los dibujos con una sencillez mucho mayor que si se usa el norte astronómico.

Elevaciones

Después que se han instalado las referencias para las dimensiones deberán construirse las de los planos de elevación. El informe del levantamiento deberá mencionar cuál es el banco del U. S. Geodetic Survey (u otro de confianza) más cercano. Puede usarse luego este banco para determinar la elevación de bancos permanentes con referencia al nivel del mar. Por comodidad, el banco de nivel de la planta se establecerá en el punto más bajo del proyecto, al que se dará la cota arbitraria de 100.000. De esta manera, todas las elevaciones del proyecto serán de 100.000 o mayores. Por tanto, los monumentos de referencia para las dimensiones pueden tener una elevación arbitraria de la planta mayor que 100.000, que puede comprobarse pasando el tiempo con el banco local.

Generalmente, los proyectos grandes se dividen en secciones. Debe fijarse una rasante o nivel de piso normal arriba del banco de nivel de la planta, para cada sección tan pronto como sea posible, de manera que el proyecto de la cimentación y el trabajo de campo y el grueso de las excavaciones pueda proseguir con otras operaciones preliminares.

Las elevaciones de las secciones o rasantes, como comúnmente se les designa, pueden fijarse mejor en los planos de proyecto con líneas de nivel. La rasante de la sección generalmente se refiere al punto más alto de la misma, por ser necesaria una pendiente para el drenaje superficial. Después que se ha determinado la rasante nominal, puede fijarse la altura del equipo arriba de ella y puede completarse la cimentación.

La elevación del equipo arriba de la rasante depende de las necesidades del proceso, de consideraciones sobre la conservación, y de los posibles peligros de operación. Como ejemplo típico, los recipientes que contienen líquidos a temperaturas y presiones cercanas a las de vaporización deben quedar más altos que el equipo de bombeo para que produzcan una carga hidráulica suficiente para que

mantengan el fluido en estado líquido. Así, el tipo de fluido, su estado en el proceso y las características de la bomba deben considerarse en conjunto para determinar la elevación adecuada. Todas las bombas de los procesos y los demás equipos mecánicos deben localizarse a una altura suficiente sobre la rasante que permita su operación, inspección normal y mantenimiento estando el personal de pie.

Las rasantes de las secciones y las elevaciones del equipo no se pueden determinar arbitrariamente, sino que deben estudiarse cuidadosamente. Mientras que la elevación de las cimentaciones arriba de la rasante se fija por razones relativas a los procesos o al mantenimiento, la profundidad mínima abajo de la rasante de una cimentación depende de la profundidad a la que se produzca la congelación o de la que tenga el estrato resistente, tomándose la que sea mayor.

Necesidad de precisión en las medidas

La gran cantidad de tuberías fabricadas requiere una precisión mayor en su localización en el campo en las obras para plantas de proceso que para otros tipos de construcción. La precisión que despliegue el dibujante en dar en los dibujos las dimensiones correctas se desperdicia si el ingeniero en el campo no da bien los alineamientos o deja de dar las mismas dimensiones cuando localiza las cimentaciones. Las tuberías fabricadas en taller se construyen con tolerancias muy pequeñas en las medidas (1.6 mm para algunos trabajos). Las tuberías construidas pueden requerir un tratamiento térmico, o pueden consistir en materiales que no se pueden alterar en el campo así, un error en la localización del equipo, tan pequeño como 1 cm, pude ser serio. Los errores en las posiciones de los pernos de anclaje en las cimentaciones para equipo importante pueden ser todavía más serios o costosos. Por lo general, los pernos de anclaje para equipo grande se fijan firmemente y se mantienen en su lugar por medio de plantillas de metal o de madera, que reducen la posibilidad de error durante el colado del concreto.

Los fabricantes cometen algunas veces errores en los primeros dibujos en los que dan dimensiones o tienen que hacer cambios al proseguir la fabricación. Por esta razón, el fabricante debe entregar sus copias finales certificando que las dimensiones son correctas. Los montadores experimentados no empiezan a usar los dibujos en la construcción antes de recibir las copias certificadas finales de todo el equipo.

Excavación

Después que se ha desmontado y emparejado el lugar, y se han definido las posiciones de los cimientos del equipo, puede comenzarse la excavación.

La excavación puede hacerse a máquina o a mano. La excavación a máquina se puede hacer con varios equipos y su elección depende del suelo y de la profundidad de la excavación. Las zanjas para tramos largos de tubos subterráneos o ductos con frecuencia se excavan con zanjadoras. La draga de arrastre que consiste en una grúa con propulsión propia equipada con un cucharón, es el tipo más popular de máquina excavadora para construcción pesada, porque la grúa también se puede utilizar para levantar equipo durante el montaje. Los bulldozers, que son simples tractores equipados con una cuchilla frontal, se usan mucho para hacer rellenos y para compactar por medio de otros aditamentos. Los tamaños y tipos del equipo para excavar y para rellenar varían con cada proyecto.

La excavación a máquina, que es mucho más barata que la excavación a mano, se usa siempre que es posible. Las plantas de proceso generalmente consisten en varias áreas separadas, pero congestionadas. Ordinariamente resulta más económico excavar a máquina el área total hasta el estrato resistente, cuando se van a colar varias zapatas separadas, que hacer a mano la excavación separada para cada zapata. Aunque haciendo esto se aumentan un poco los moldes, la ventaja de disponer de un espacio mejor para trabajar para el personal, reduce el tiempo y el costo de la colocación del acero de refuerzo. Se pueden hacer simultáneamente las instalaciones de tuberías y anclajes para soportar los empujes de las mismas, de ductos para las instalaciones eléctricas y conexiones a tierra, eliminando así prácticamente toda la excavación a mano.

Las filtraciones de agua producidas al penetrar el nivel freático o por cortar algún estrato con agua en las operaciones de excavación, son un problema común en las operaciones en el subsuelo. Si el área en general tiene pendiente suficiente, se puede impedir la entrada del agua poniendo una ataguía de tablestacas de acero en el costado superior de la excavación.

En todas las excavaciones importantes se deberán disponer medios para bombear el agua que se filtre o que caiga de la lluvia. Se dispondrán uno o dos cárcamos con bombas.

A veces resulta efectiva una capa delgada de concreto pobre de unos 5 o 7 cm de espesor sobre el fondo de la excavación para detener las filtraciones de agua. Este método se usa con regularidad en las excavaciones grandes para mejorar las condiciones de trabajo y para evitar la contaminación del concreto. Los suelos acuíferos inestables o los arenosos que están propensos a derrumbarse requieren precauciones de seguridad adicionales, para la protección tanto del personal como del equipo.

Cuando se cometen errores en la profundidad de las excavaciones o que accidentalmente se quita tierra alrededor de las cimentaciones construidas, hay que rellenar con cuidado. A esta operación se le llama hacer rellenos. Para este objeto, algunas veces se usa grava pesada o concreto ciclópeo si la profundidad del relleno no es grande.

Si las condiciones del suelo son malas y su resistencia es baja, deberá evitarse hacer rellenos con materiales pesados como la grava o el concreto. El procedimiento más seguro es hacer los rellenos con concreto pobre. Los rellenos donde se vaya a construir una losa corrida o una losa de trabajo deberán hacerse siempre cuidadosamente y cada capa de tierra deberá apisonarse con máquina. Las especificaciones para rellenos, que estipulen el tipo de material que se permite emplear para hacerlos, deberán prepararse desde el principio del proyecto y deberán seguirse con toda exactitud.

También se llama relleno a la operación de llenar las excavaciones de tierra después de que se han colado los cimientos. A veces se usa arena o grava barata para esta operación. Si los materiales de relleno van a quedar sujetos al efecto del agua subterránea en movimiento, deberá tomarse la precaución de que queden confinados, ya sea por el mismo concreto, por las ataguías, o con algún suelo impermeable.

Es un mal procedimiento tratar de ahorrar en concreto construyendo una zapata sobre un relleno de tierra o sobre un suelo removido. Todos los dibujos que se hagan para la construcción de cimientos deberán llevar la siguiente nota: "Todas las cimentaciones se desplantarán sobre un suelo resistente que no haya sido removido", y no se infringirá esta orden a menos que exista una justificación importante.

Deberá tenerse un gran cuidado al hacer excavaciones cerca de los cimientos importantes, y con un buen programa de trabajos se puede eliminar la necesidad de hacer estas excavaciones.

Construcción de moldes

Las diferentes estructuras en que se vierte el concreto cuando está fresco se llaman moldes. La construcción de los moldes es el concepto más costoso en las obras de concreto.

Los moldes pueden construirse de madera o de metal. Los metálicos requieren menos mano de obra que los de madera, pero deberán proyectarse de acuerdo con la forma y longitud de la lámina. Los moldes metálicos son fuertes y con un cuidado razonable duran varios años. Los de madera pueden usarse varias veces, pero la limpieza de los moldes de madera es cara.* El acabado de las superficies de concreto es una operación costosa que se hace a mano, que puede eliminarse casi completamente con los moldes metálicos porque las superficies de éstos son lisas y parejas.

Concreto reforzado

Como el concreto es el material principal en la construcción de cimentaciones de concreto reforzado, en cualquier discusión sobre ci-

* Los moldes se pueden aceitar antes de usarlos para despegarlos con facilidad del concreto. Varias grasas con siliconas han resultado excelentes para este objeto.

mentaciones debe darse una breve descripción de su composición y características.

El cemento y el concreto

El concreto se compone de cemento, agua y agregados, como arena y piedra triturada o grava. El cemento, como su nombre lo indica, es el agente que forma una masa dura con los agregados. El cemento portland, que se usa en la mayor parte de las construcciones, se compone esencialmente de cuatro compuestos básicos: silicato tricálcico ($3\ CaO \cdot SiO_2$), silicato bicálcico ($2\ CaO \cdot SiO_2$), aluminato tricálcico ($3\ CaO \cdot Al_2O_3$), y ferritas parecidas a los aluminatos.

Estos materiales se preparan calcinando en proporciones convenientes las materias primas que contienen CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe. Los terrones de escoria que salen del horno de cemento se pulverizan formando un material pulverulento seco.

Cuando el cemento se mezcla con los agregados fino y grueso adecuados y agua, en las proporciones correctas, endurece formando una masa sólida que se conoce con el nombre de concreto. La resistencia y otras características del concreto varían con el tipo de cemento usado, las proporciones de la mezcla, la clase y tamaño de los agregados, la cantidad de agua empleada en su preparación y el proceso de curado después del colado.

Aunque la resistencia del concreto puede llegar a ser de 560 kg/cm^2, a la compresión, su resistencia a la tensión es aproximadamente igual a la décima parte de ésta. En los proyectos no se considera su resistencia a la tensión. Esta es la razón por la que hay que añadir otro material al concreto que le dé resistencia a la tensión o a la flexión. Se colocan dentro del concreto alambres de acero o varillas en posiciones determinadas para que absorban esfuerzos o para que refuercen la masa de concreto. Por tanto, el proyecto del concreto reforzado consiste principalmente en la determinación de las cantidades y posición del acero de refuerzo.[4, 9]

Resistencia del concreto

La reacción fisicoquímica entre el cemento y el agua requiere cierto tiempo para el fraguado inicial, y un tiempo mayor para alcanzar la resistencia de proyecto. Para uniformar los procedimientos de prueba, la resistencia a la compresión que se usa para el proyecto es el esfuerzo que soporte a los 28 días. El uso del intervalo de tiempo de 28 días es el resultado de extensas investigaciones. Aunque el concreto continúa endureciendo, la curva de su resistencia a la compresión se aplana bastante después de los 28 días, cuando el concreto se cura en el aire, sin emplear procedimientos especiales de curado.[5]

En la resistencia del concreto influyen muchos factores entre los cuales, el agua es el más importante. Los resultados de muchas pruebas controladas demuestran que la resistencia a la compresión varía de un máximo de 530 kg/cm² a un mínimo de 190 kg/cm² a los 28 días para relaciones agua-cemento de 17.8 lt a 35.6 lt por saco de cemento de 50 kg, respectivamente.

Los métodos de curado también afectan la resistencia. El concreto curado continuamente en la humedad en un año muestra un aumento hasta de 160% de la resistencia a los 28 días. El aumento es de 140% a los 100 días. El curado al aire (sin humedad) produce una resistencia de aproximadamente 75% de la de proyecto a los 30 días. Aparentemente, el curado húmedo a cualquier tiempo después del periodo de curado seco aumenta mucho la resistencia.

La temperatura de curado también influye en la resistencia. Se han reportado resistencias a los siete días del 44% y 65% para curados a 0.6°C y a 22.2°C respectivamente. La Portland Cement Association[5] recomienda que se hagan pruebas para determinar las curvas de compresión para 7 y 28 días con los materiales que van a usarse. Estas curvas indicarán la mejor relación agua-cemento y posiblemente los procedimientos de curado más efectivos.

La relación agua-cemento, como se indicó antes, debe controlarse con precisión. Esta relación se expresa en litros por saco de 50 kg, y varía de acuerdo con la resistencia requerida, el tipo y tamaño del agregado, las condiciones en que se haga la mezcla, las condiciones en que se descargue de la mezcladora, y del colado. La variación, como ya se dijo, es de 17.8 a 35.6 lt por saco de 50 kg. A los agregados almacenados a la intemperie debe determinársele la humedad y deducirse del agua que va a usarse. Este valor se comprueba fácilmente sacando una cantidad medida de agregado a 93.3°C y pesándola. Midiendo y pesando iguales cantidades de material sin secar darán el volumen aproximado de agua por metro cúbico.

Existen varios cementos de endurecimiento rápido que disminuyen el tiempo empleado en este proceso. En algunas mezclas se puede alcanzar la resistencia de proyecto, o sea la de 28 días, 12 o 14 hr después de hacer el colado. Como estos materiales son más costosos que el cemento portland, y como al aumentar la velocidad de la reacción se aumenta la cantidad de calor producido que generalmente requiere un curado más costoso, no se usan comúnmente en la construcción ordinaria.

Se dispone de algunos aditivos para aumentar la densidad, la resistencia al agua, las características superficiales y la resistencia al desgaste en el concreto. El procedimiento de curado del concreto fresco o del que queda en superficies expuestas es también muy importante para la resistencia al desgaste y características para resistir la intemperie en el concreto terminado.

Especificaciones

Las resistencias que comúnmente se usan en el concreto son: 150, 200, 250 y 300 kg/cm² a los 28 días. Al especificar la resistencia se está estableciendo la relación agua-cemento, porque es la que fija la resistencia a los 28 días. Las empresas que ordinariamente abastecen concreto mezclado están familiarizadas con este tipo de especificaciones y, por tanto, surten concreto que satisface éstas o las mejora.

Para comprobar la resistencia del concreto, se toman muestras de cada revoltura entregada que se envían al laboratorio en moldes de cartón especiales de 15 cm de diámetro y 30 de altura. Estos cilindros se guardan en condiciones controladas y se prueban a la compresión, hasta que fallan, a intervalos de 7, 14 y 28 días. En ciertos tipos de trabajos conviene especificar el número mínimo de sacos de cemento por metro cúbico de concreto, y el máximo de litros de agua por saco de cemento. La prueba de revenimiento que se describe en la especificación de la ASTM No. C 143-39 se usa con frecuencia como prueba de consistencia cuando se está colando el concreto.

La American Society for Testing Materials ha preparado varias pruebas para calificar el cemento, el concreto y los agregados. Estas pruebas son la base de todas las especificaciones cuidadosamente preparadas para el concreto. La Portland Cement Association[5] ha editado especificaciones que se sugieren para el concreto, así como literatura sobre el uso correcto del concreto sin y con refuerzo.

Acero de refuerzo

El material básico resistente que se usa en el concreto es el acero en forma de varillas, barras y tejidos de alambre.[4] El material de refuerzo más común son las varillas de acero redondas. Las especificaciones comunes para las varillas son: para las varillas hechas de acero de lingote la ASTM A15-50T; para las varillas hechas con acero de rieles la ASTM A16-50T; para el alambre estirado en frío ASTM A82-34; y para la tela de alambre soldada, ASTM Al 85-37. Las llamadas varillas corrugadas tienen salientes que se les hacen por forjado o laminación. Para las dimensiones de las salientes véase la ASTM A305-50T. En la actualidad solamente se usan las varillas corrugadas y sus tamaños se especifican por número (no por diámetro) de acuerdo con el U.S. Department of Commerce Simplified Practice Recommendation R-26. Los números de las varillas corresponden aproximadamente al número de octavos de pulgada que tiene su diámetro hasta la del No. 8, que es la de diámetro de una pulgada. En la norma que se recomienda sólo se mencionan tres tamaños de varillas cuadradas, empezando con la de 1 plg, que es la No. 9; 1⅛ plg la No. 10; y la 1¼ plg la No. 11. La varilla más delgada es

la No. 2 redonda, que tiene un diámetro de ¼ plg. Esta varilla se fabrica lisa o corrugada y generalmente se le llama alambrón. Se usa con varios objetos como, por ejemplo, en amarres, pero generalmente no se usa como refuerzo.

La resistencia o límites de los esfuerzos para el acero de refuerzo varían de 985 kg/cm² a 2 110 kg/cm², según lo estipulado en el proyecto y el acero usado. Las resistencias especificadas usualmente son 1 265 kg/cm² o 1 410 kg/cm². Se pueden encontrar las diferentes resistencias en las especificaciones anteriormente mencionadas de la ASTM.

Otro material de refuerzo común se conoce con el nombre de tela de alambre soldada. Este material consiste en alambre de acero soldado formando una especie de malla. La separación y el calibre de los alambres deben especificarse de acuerdo con la costumbre comercial. Una malla de 6 × 6—10/10 es una en que los cuadrados de 6 plg están formados por alambres de calibre 10.

Colado del concreto

Después que se han construido los moldes y se ha colocado el acero de refuerzo, puede colarse el concreto para formar la cimentación. El concreto se puede mezclar en el lugar del colado o en otro lugar. Para un proyecto grande se puede instalar una planta mezcladora central, en la que se mezcla todo el concreto, que luego se lleva a los diferentes lugares en carretillas de mano para concreto o en camiones. También se puede usar concreto mezclado cuando haya quien lo surta. Este tipo de concreto lo venden ya mezclado compañías que lo fabrican y lo entregan en el lugar del colado en la obra en camiones especialmente construidos.

El colado del concreto es una operación relativamente sencilla. La masa plástica se vierte o se palea a los moldes. En los colados grandes (de varios cientos de metros cúbicos) o en los que van a cubrir una superficie grande se usan generalmente canalones metálicos para conducir la masa húmeda a su lugar. A veces se usan grandes botes, con capacidad de 400 a 1 600 lt de concreto. El concreto se vierte en el bote, que a su vez es transportado por una grúa al lugar necesario. Los canalones deben tener una pendiente suficiente que permita al concreto correr con facilidad. En algunos tipos de obras se usan transportadores o tuberías.

Cuando se comienza el colado de una losa grande de concreto, como la de una gran cimentación, no debe interrumpirse hasta terminarlo. Una interrupción permitiría un fraguado inicial (solidificación) y el concreto que se colara después no se adheriría correctamente y podrían producirse planos de debilidad. Cuando se trate de hacer colados muy grandes deberá asegurarse la continuidad de la operación incluyendo la mezcla, el transporte y el colado.

Al ir vaciando el concreto en los moldes se pica a mano con palos

o palas de madera, continuamente, para que llene bien el contorno de los moldes. También se usan vibradores neumáticos todo el tiempo que dure el colado.

Nunca deberá añadirse agua al concreto después que se ha vaciado en los moldes. No se puede cambiar arbitrariamente su fluidez añadiéndole agua, porque al hacerlo, se modifica su relación agua-cemento necesaria para la resistencia de proyecto. Sin embargo, existen varios aditivos que disminuyen la viscosidad del concreto sin aumentar la relación agua-cemento.

Curado de las cimentaciones de concreto

Para que el concreto fresco adquiera su máxima resistencia debe protegerse de las pérdidas de agua por evaporación y de las temperaturas demasiado bajas o altas. Esto es especialmente importante en los primeros 7 o 10 días.

El concreto debe mantenerse húmedo, regándolo, cubriéndolo con agua, aplicándole riegos impermeables a la humedad, y usando cubiertas que retengan la humedad como telas de yute o de algodón.

El aire alrededor del concreto debe mantenerse a una temperatura de 21°C o mayor cuando menos por tres días. En tiempo frío es algunas veces necesario calentar el agua y los agregados antes de hacer la mezcla, para proporcionarles una temperatura inicial suficiente para producir la reacción de hidratación con una rapidez favorable. Sin embargo, el concreto fresco no deberá tener una temperatura superior a 26°C, porque el calor de la hidratación aumenta todavía más la temperatura del concreto. Las temperaturas excesivamente elevadas producen un rápido endurecimiento perjudicial que puede producir grietas en el concreto.

Para mantener una atmósfera de 21°C durante el tiempo frío es necesario cubrir el concreto con lonas. Colocando paja u otro material debajo de la lona se aumenta el espesor de la barrera aisladora. Cuando el tiempo es extremadamente frío deberá aplicarse calor en forma de vapor debajo de una tienda de lona. Este procedimiento es costoso.

Aunque la resistencia del concreto aumenta con la temperatura de curado hasta cierto punto (la máxima se produce entre 38 y 93°C), la tendencia al agrietamiento también aumenta. Es por tanto necesario precaverse contra las temperaturas excesivamente elevadas durante tiempo caliente, impidiendo que caigan sobre el concreto los rayos directos del sol y usando agua fría para hacer la mezcla.

La cimentación terminada

Después que ha curado el concreto, se quitan los moldes cuidadosamente para evitar daños en las superficies. Las salientes se quitan con un cincel. Los agujeros se pueden reparar profundizándolos

cuando menos 2.5 cm y dándoles forma cuadrada. El área excavada se llena con capas sucesivas de 1 cm de concreto rico. Los cimientos de los compresores y de las bombas deben dejarse con la superficie superior áspera de manera que el mortero se adhiera bien cuando se instale la máquina.

Durante la construcción y después de terminados los cimientos deben protegerse todos los pernos de anclaje para que no se dañen ni se doblen. Para la maquinaria grande como los compresores, son preferibles los pernos que se pueden quitar (Fig. 22-9*A*). De esta manera las máquinas pueden arrastrarse hasta que queden en su posición cuando se han quitado los pernos, y los pernos rotos se pueden cambiar con facilidad.

Piloteados

Cuando se requieren pilotes se hincan con un martinete apoyado en guías verticales sostenidos por una grúa ordinaria o por medio de una piloteadora que está hecha específicamente para hincar pilotes. Al martinete lo impulsa un motor de vapor de efecto sencillo o de doble efecto, de pistón. El motor de efecto sencillo levanta el martinete (de 1 360 a 2 265 kg) y le permite caer por gravedad sobre el pilote desde una distancia de 90 cm aproximadamente. El martinete de doble efecto aumenta la fuerza de la caída en la carrera hacia abajo. Para hincar pilotes ligeros a veces se usan martinetes de gravedad. Estos son aparatos más sencillos que emplean malacates y montacargas para levantar el martinete que luego se deja caer por gravedad.

El hincado de los pilotes lo aprecian los operadores expertos por los centímetros de penetración a cada golpe. Generalmente se hin-

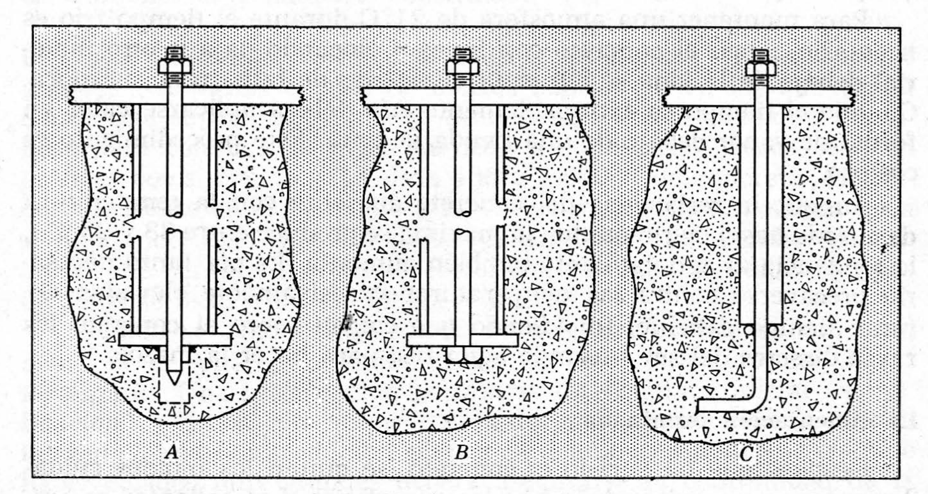


FIG. 22-9. Pernos de anclaje típicos. [Reproducción autorizada, Geo. Stevens, *Power*, *91*, No. 2, 111 (1947).]

can hasta que alcancen una resistencia predeterminada que se mide por el número de golpes para la penetración final de un centímetro. A su vez, el último golpe se relaciona empíricamente con la carga de seguridad que el pilote puede soportar.

Se puede ayudar a la penetración de los pilotes en terrenos densos aprovechando el efecto de aflojar el terreno de un fuerte chorro de agua colocado cerca de la punta del pilote. Al chorro de agua se le llama chiflón.

PLANEACION Y DISTRIBUCION DE LOS CIMIENTOS

Métodos generales

La distribución y proyecto preliminar de los cimientos comienza con la distribución del equipo principal de proceso. Bombas, compresores, recipientes, intercambiadores de calor, u otro equipo localizado esencialmente a la rasante, se coloca en secciones de concreto separadas elevadas. La base del equipo o la parte superior de concreto está siempre elevada cuando menos 15 cm arriba de la rasante nominal del área. En general, todo el equipo principal ya sea encerrado bajo techo o al descubierto, tiene una cimentación separada o independiente. Las cimentaciones independientes son las que no están unidas al piso o losa del área de trabajo y que se prolongan hasta la profundidad necesaria para transmitir la carga a un estrato resistente cuando se usan zapatas, o a un cabezal de pilotes, en el caso de cimentaciones piloteadas. Las bases de las columnas de acero de las estructuras o los soportes de acero estructural para el equipo (Figs. 22-1, 4 y 5) se colocan sobre pedestales de concreto reforzado, que se prolongan arriba de la rasante del área y están provistas con pernos de anclaje colados en el lugar. Las estructuras de acero, así como otras piezas del equipo, deben fijarse firmemente en su lugar. Los pedestales de concreto separados que soportan las columnas se prolongan hasta zapatas independientes o a un cabezal de pilotes.

Dibujos del equipo

Como las dimensiones del equipo varían, y las cimentaciones no pueden proyectarse hasta que se conocen los datos de las dimensiones, los diferentes fabricantes preparan dibujos en los que se dan las dimensiones necesarias para la instalación de su equipo. El fabricante utiliza también estos dibujos para obtener la aprobación del comprador. En esta forma se establece una serie de intercambios, como se describió en el Cap. 9. De acuerdo con el tipo del equipo, pueden transcurrir varios meses desde la orden de colocación y recepción de los datos del fabricante o de las copias del vendedor.

Las copias del vendedor son la única fuente de confianza de datos

de las dimensiones y es necesario que éstas sean precisas para la preparación de todos los dibujos de las instalaciones incluyendo los de las cimentaciones. Por tanto, los fabricantes deben certificar la corrección de las dimensiones que llevan los dibujos que proporcionan. A estas copias se les da el nombre de Copias Certificadas del Vendedor y en efecto garantizan que el equipo se entregará de acuerdo con las dimensiones que llevan los dibujos. Aunque se pueden colar las porciones inferiores de los cimientos formadas por bloques de grandes dimensiones, las porciones superiores o finales, que contienen los pernos de anclaje y que se ajustan a la forma del equipo no pueden colarse hasta que se reciban estos datos dimensionales certificados. La falta de las copias del vendedor puede retrasar tanto la construcción como la entrega del mismo equipo.

Aspectos económicos

Como en la mayor parte del proyecto y planeación de la construcción de la planta, la cuestión económica es importante. Deberán tomarse en cuenta los siguientes factores de costo.

Costo del concreto

El concreto mezclado, listo para vaciarlo o colarlo en un molde, es un material relativamente barato que cuesta de $6.5 a $19.60* el metro cúbico. Este costo, hasta antes de colarlo, depende de: (1) su cantidad; (2) del método de mezclado; y (3) de la dosificación de la mezcla, en el orden que se dan. Estos son los costos de mezclado. Sin embargo, el costo final del concreto es mucho mayor, variando de 52.3 para los colados sencillos a $262.00 por metro cúbico para los colados más complicados. Este aumento se debe a: (4) costo del material y mano de obra para construir los moldes; (5) material y mano de obra para doblar y colocar el acero de refuerzo; (6) mano de obra para el colado, incluyendo vibrado; (7) mano de obra y material para el curado; (8) mano de obra para quitar los moldes; (9) mano de obra y material para el acabado superficial. En los conceptos de 4 al 9, la mano de obra es el factor principal, que varía del 50 al 80% del costo total. El costo de la mano de obra para la construcción de los moldes generalmente supera a todos los demás.

El costo de las cimentaciones de concreto rara vez excede de $85.00 el metro cúbico, según los costos de la mano de obra en 1954. El costo de la mano de obra es aproximadamente del 60%. Esta cantidad no debe usarse indiferentemente para todos los tipos de cimentaciones. El costo por metro cúbico en grandes losas corridas de muchos cientos de metros cúbicos de concreto con muy pocos moldes, o ningunos, puede ser mucho menor de $85.00. Otros factores que

* Las cantidades monetarias que se citan en este libro están dadas en dólares de los Estados Unidos. (N. del R.)

afectan el costo de la mano de obra es su productividad en la región, las condiciones climatológicas, las condiciones de trabajo y el tipo de la obra.

Comparación de los costos del concreto preparado y del fabricado en el lugar

Algunos otros costos básicos, como la fuente de materiales para el concreto algunas veces afectan seriamente los costos de la cimentación y de otros materiales para concreto. El concreto puede mezclarse en la obra o puede comprarse ya mezclado. Dentro de esta nación, en todas las regiones industriales se entrega concreto mezclado en el lugar donde se va a colar a un precio determinado. Generalmente, el costo del concreto que se compra ya mezclado tendrá un valor muy parecido al del costo del concreto mezclado en la planta, cuando las cantidades que se van a usar no exceden de 3 000 a 4 000 m^3. Al comparar los dos costos, en el mezclado en la planta se deberán incluir los costos del equipo suponiéndolo rentado, los movimientos del material para llevarlo a la mezcladora, y los del transporte del concreto en la misma obra. Si el concreto se va a mezclar en el lugar, deberán prepararse almacenes secos para el cemento, para los agregados y el abastecimiento de agua. En los climas fríos se deberán disponer medios para calentar el agua y generalmente también los agregados. Por tanto, si la cantidad de concreto necesario no es grande, generalmente resulta más económico comprar concreto mezclado, que sólo haya que vaciar en los moldes.

Moldes y dimensiones

Como el costo mayor en la construcción de cimentaciones es el de la mano de obra para la construcción de moldes, la simplificación de la forma de los colados y por consiguiente la de los moldes, reducirá los costos. Por tanto, habrá que evitar todos los cambios en la superficie que puedan hacerse para lograr pequeñas economías en el volumen de concreto. La construcción de moldes de tableros planos es menos costosa que con salientes, resaltos o cambios cualesquiera en la forma de la superficie.

El uso de moldes metálicos para todas las superficies planas ahorra tanto material como mano de obra, porque estos moldes se pueden levantar aproximadamente en la tercera parte del tiempo requerido para los moldes de madera y pueden volver a usarse en seguida después de haberlos quitado. Además, la superficie de concreto requiere poco o ningún acabado, porque los moldes metálicos dejan una superficie pareja y limpia. Los moldes metálicos modulados pueden usarse en prácticamente todos los tipos de trabajos de concreto, pero las dimensiones de la cimentación deben ajustarse a los tamaños de los moldes disponibles.

Los costos se reducirán si las dimensiones de las cimentaciones se basan en los tamaños comerciales de la madera o de los moldes metálicos. Deben evitarse las fracciones de pulgada, a menos que sean indispensables debido a las dimensiones de los pernos de anclaje.

Uniformidad

Se puede obtener mayor economía uniformando ciertos tipos de cimientos. En la mayor parte de las obras se requieren varios pedestales cuadrados para soportar columnas de concreto estructural para sostener tuberías. Estableciendo un tamaño único para estos pedestales y para los pernos de anclaje, tomando como base las condiciones de servicio más severas, el costo de proyecto, dibujo e ingeniería de campo y construcción de moldes, en general se reducen mucho los costos.

PROYECTO DE LA CIMENTACION

Bases de proyecto y mecánica de suelos

Un cimiento consta de: una masa de concreto, las varillas de refuerzo, y el suelo en que se apoya. Como la parte artificial de la cimentación debe estar apoyada y rodeada por el subsuelo, es imposible elegir un tipo de cimentación y proyectarlo para una aplicación dada sin estudiar cuidadosamente la mecánica del suelo.

Debido a la gran variedad de condiciones que puede presentar el subsuelo, peculiares a cada región, el proyectista debe confiar en un criterio basado en la experiencia en la región. Por esta razón es un método común consultar a ingenieros locales para que cooperen en los análisis del suelo y en el programa de pruebas, así como en tomar decisiones necesarias para la selección y proyecto de la cimentación.

El proyecto de cimentaciones se hace empíricamente en muchos aspectos. Esto es especialmente cierto si la cimentación se apoya en arcilla, arena o limo. Es necesario hacer pruebas de carga en el lugar de la obra cuando se presenta un suelo de capacidad de carga dudosa. Cuando estas pruebas se hacen correctamente, sujetan a los estratos del subsuelo a condiciones semejantes a las previstas para el equipo de la planta.

Las pruebas de carga se hacen aplicando pesos (arena, roca, acero) a una plataforma que descansa en pilotes o placas de apoyo, si es que no se consideran necesarios los pilotes. Las placas de apoyo deben descansar en el suelo al mismo nivel de desplante que se va a usar en los cimientos. Al ir aplicando la carga, se van registrando los asentamientos observados. Algunas veces estas pruebas pueden resultar costosas, pero deben hacerse de cualquier manera cuando las recomienden expertos competentes en mecánica de suelos. Los datos

obtenidos con las pruebas de carga, en combinación con los datos de los análisis de suelos, son las únicas bases seguras en que se puede apoyar el proyecto en suelos dudosos.

Asentamientos y fallas de la cimentación

Deben tomarse en cuenta dos factores importantes en el proyecto de cada cimentación. Primero, debe proyectarse una cimentación para que el suelo o roca sobre el cual se apoyará, soporte la carga aplicada por el peso del cimiento y del equipo que lleva. Las cargas producidas por el viento y otras fuerzas externas deben considerarse también. El factor separado más importante en esta fase del proyecto es la capacidad de carga del suelo o roca. Si se excede la capacidad de carga, el suelo o roca cederán y la cimentación se hundirá en el terreno.

Sin embargo, es posible construir una cimentación que no exceda la capacidad de carga del suelo, pero que se asiente en el mismo. Si este asentamiento es excesivo puede producir el agrietamiento de la cimentación. especialmente si el asentamiento es disparejo y produce deformaciones excesivas en las estructuras que están soportadas por la cimentación. Los asentamientos diferenciales entre múltiples zapatas que soportan una sola estructura pueden producir dificultades, porque las columnas de concreto empiezan a agrietarse cuando los asentamientos diferenciales exceden de 2 cm. El acero y el ladrillo pueden soportar mayores asentamientos, pero a los dos afectan desfavorablemente.

Procedimientos de proyecto

No se intenta aquí describir ni recomendar técnicas de proyecto, porque las cimentaciones, debido a su naturaleza empírica, deben proyectarse y elegirse por expertos en esa materia.

La breve descripción de los factores que hay que considerar en los difrentes tipos de cimentaciones para plantas de proceso proporcionará un conocimiento superficial que, si se usa correctamente, ayudará al ingeniero que proyecta la planta a entender los problemas del ingeniero especialista en cimentaciones.

Los suelos y el proyecto

Como ya hicimos resaltar, el carácter del suelo o de la roca en que se van apoyar las cimentaciones es un factor importante para su proyecto. Cada tipo requiere una base diferente para justificar su proyecto. Por ejemplo, generalmente se encontrará que la presión permitida en el suelo para el asentamiento máximo, cuando éste es arena, es menor que la capacidad de carga para que falle.* Por tanto,

* Generalmente el factor de seguridad para la capacidad de carga es 3.0

en los proyectos de cimentaciones sobre arena, gobierna el proyecto el asentamiento permitido. La anchura de una zapata o de una losa corrida localizada en arena influye en la capacidad de carga permitida en el suelo (cuanto más anchas son las zapatas, mayor es la capacidad).

Por otra parte, en las arcillas no se producen estos aumentos en la capacidad permisible o de seguridad con la anchura. Además, no puede establecerse definitivamente si el asentamiento o la capacidad de carga controlarán el proyecto de la cimentación en las arcillas. Deben comprobarse ambas. Después que se haya proyectado para un suelo arcilloso, debe hacerse una predicción del asentamiento basada en las pruebas de consolidación de laboratorio.

En las arcillas y los limos, el único método seguro para determinar la carga de seguridad en los pilotes es haciéndoles pruebas de carga. Las fórmulas empíricas para determinar la carga de seguridad deben usarse solamente, cuando la experiencia adquirida en suelos semejantes, indica que las fórmulas son seguras.

Cálculos de proyecto

Una vez que se ha determinado la presión de seguridad permitida para el suelo, por medio de una combinación de pruebas de suelos y teorías, puede proseguirse el proyecto de la cimentación correspondiente a la porción de concreto.

En la industria generalmente se preparan formas para proyectos específicos. En estas formas se siguen los pasos lógicos del cálculo. Como en las cimentaciones, el papel principal lo desempeñan los pesos, todos ellos se tabulan. La mayor parte de los ingenieros usan como unidad la tonelada métrica de 1 000 kg.

Aunque en muchas organizaciones se usan formas estándar, los procedimientos varían mucho. Se han publicado muchas de estas técnicas y las comunes a las plantas de proceso se incluyen en las referencias.[2, 4, 6, 7, 8 9 10]

Zapatas

Cuando se trata de una zapata cargada simétricamente, el área se determina por medio de un cálculo muy sencillo, cuando se dan el desplante de la zapata y la presión de seguridad para el asentamiento o la carga de seguridad admitida. El área se deduce de la preción permitida en el suelo o capacidad de carga, empleando la que controle, como sigue:

$$S_1 = \frac{W}{a} \quad (1)$$

siendo: S_1 = presión en el desplante kg/cm²
W = peso de la estructura y de la cimentación
a = área de la base de la cimentación

Aunque se puede calcular el área o la carga sobre el suelo para una área determinada, deben hacerse varias suposiciones y consideraciones para hacer este sencillo cálculo. Primero, debe determinarse la capacidad de carga o presión permitida en el suelo para el asentamiento, por medio de estudios de suelos. Segundo, la profundidad del desplante de la cimentación debe fijarse principalmente por criterio. Por supuesto, debe quedar abajo de la línea de congelación. Finalmente, debe corregirse algo la suposición de que la cimentación está cargada simétricamente, porque en la mayor parte de las plantas de proceso las cimentaciones no están cargadas de esta manera.

Las torres con zapatas (Fig. 22-1) como las de destilación fraccionada, y otros equipos altos soportan fuerzas laterales debidas al viento o a los terremotos que producen cargas excéntricas en las cimentaciones. El análisis exacto de estos casos no es posible, porque faltan datos experimentales y teóricos. Sin embargo, deben analizarse lo mejor posible, porque estas cimentaciones son comunes.

V. O. Marshall,*[8] ha escrito un procedimiento muy aceptado para el proyecto de estas zapatas. El proyecto se hace necesariamente por tanteos. Se supone una cimentación. Luego se revisan las cargas en el suelo y la estabilidad. La carga máxima que produce la torre en el suelo es una combinación de la carga muerta (peso de la torre, y aditamentos, y la cimentación dividido por el área de la base del cimiento) y la carga de vuelco producida por el viento u otras fuerzas laterales. Esta combinación será de una magnitud mayor del lado de sotavento (lado más lejano del viento) de la cimentación. La carga de vuelco para una torre cilíndrica se puede calcular como sigue:

$$S_2 = \frac{M_f}{Z} \tag{2}$$

siendo S_2 = carga unitaria en el suelo debida al vuelco kg/cm²
Z = módulo de la sección para la base de la cimentación
$0.1016d^3$ para el octágono
$0.118d^3$ para el cuadrado
$0.098d^3$ para el círculo
d = distancia más corta entre orillas, cm
M_f = momento de vuelco con relación a la base del cimiento (kg-cm) = P_wL
$P_w = P_cD_0H$†
P_c = presión del viento kg/m² para torres redondas
$P_c = 0.0025V^2$

---

* El material de esta sección se basa en parte en el artículo de V. O. Marshall.

† Algunos proyectistas incluyen un factor adicional para tomar en cuenta las fuerzas del viento sobre escaleras, plataformas, etc.

V = velocidad del viento en km/hr
D_0 = diámetro exterior de la torre incluyendo el aislamiento cm
H = altura de la torre, en m
L = brazo de palanca en cm = altura del cimiento en cm más $H/2$

La carga total en el suelo es

$$S = S_1 + S_2 \quad (3)$$

Además de estas cargas, debe comprobarse la estabilidad de la torre. La suma de los esfuerzos en cualquier punto sobre la cimentación debe ser positiva, o la estructura corre el peligro de volcarse. Debe comprobarse que S_2 es positiva en el punto F en la Fig. 22-1 y del mismo valor numérico, pero negativa en el punto E, (se consideran positivas las que se dirigen hacia abajo). La carga mínima en el suelo en el punto E, por tanto, es la diferencia entre S_1 y S_2. Las condiciones, cuando la inestabilidad es mayor, ocurren siempre cuando se monta la torre, antes de que la adición de los pesos de aditamentos internos, escaleras y tuberías aumenten el peso muerto lo suficiente para contrarrestar la carga negativa del lado de barlovento. Para determinar el grado de estabilidad deberá usarse la S_1 obtenida del peso de la torre sin aditamentos interiores más el peso de la cimentación.

El ejemplo siguiente servirá para ilustrar el procedimiento de cálculo que se acaba de discutir.

EJEMPLO: (Reproducción autorizada por Marshall, V. O., *Petroleum Refiner*, 22, No. 8, 101 (1943).

Proyectar la cimentación para una torre de 1.20 m de diámetro y 15.20 m de altura, incluyendo un faldón de 1.20 m y que pesa 14 000 kg vacía. El aislamiento, plataformas y tuberías pesan 4 000 kg, la velocidad máxima del viento es 160 km/h, y la línea de congelación en el lugar propuesto para la instalación está a 1.20 m bajo el piso. La carga máxima de seguridad del suelo es de 9 800 kg/m².

SOLUCIÓN: Como la línea de congelación está a 1.20 m abajo de la rasante, la cimentación tendrá una profundidad de 1.80 m, con el lecho superior a 0.30 m arriba de la rasante, de manera que el desplante de la cimentación queda a 1.50 m abajo de la misma, o sea a 0.30 m abajo de la línea de congelación.

La cimentación tendrá forma octagonal, que es la que se recomienda para estos casos, porque en ella se combinan características de estabilidad, facilidad de construcción y cantidad mínima de material mejores que las de otras formas. El pedestal tendrá un diámetro menor de 1.80 m, ya que la torre tiene 1.20 m y deberá dejarse espacio para los pernos de la cimentación, etc. Se supondrá que el diámetro menor de la base es de 4.10 m. El espesor de la base dependerá de los esfuerzos de flexión y de los de corte; sin embargo, esa fase del proyecto no se discutirá, y supondremos que el espesor es de 0.60 m.

Se calculará el peso del cimiento y de la torre como sigue:

Area de un octágono de 1.80 m	$= 0.828d^2 = 0.828 \times 1.80^2 = 2.68$ m²
Volumen del pedestal	$= 1.20 \times 2.68 = 3.216$ m³
Area del octágono de la base (a)	$= 0.828 \times 4.10^2 = 13.92$ m²
Volumen de la base	$= 0.60 \times 13.92 = 8.352$ m³
Volumen total	$= 3.216 + 8.352 = 11.568$ m³
Peso del concreto	$= 11\,568 \times 2\,400 = 27\,663$ kg

Volumen del relleno de tierra

$$(1.20 \text{ m} - 0.30) \times (13.92 \text{ m}^2 - 2.68 \text{ m}^2) = 10.116 \text{ m}^3$$

Peso del relleno de tierra $= 10.116 \times 1\,600$ kg/m³ $= 16\,186$ kg
Peso de la torre vacía $= 14\,000$ kg

$${}^*W_t = 14\,000 + 27\,663 + 16\,186 = 57\,849 \text{ kg}$$

* W_a será como sigue:

Aislamiento, plataformas, tuberías, etc	$= 4\,100$ kg
Agua necesaria para llenar la torre (de 1.20 m de diá) (15.20 m de alta)	$= 17.200$ kg
(W_a) total	$= 20\,300$ kg

$W = 57\,849 + 20\,300 = 78\,149$ kg
$a = 13.92$ m², y de la Ec. 1

$$S_1 = \frac{78\,149 \text{ kg}}{13.92 \text{ m}^2} = 55\,614 \text{ kg/m}^2 = \text{máxima carga muerta sobre el suelo}$$

Dejando 76.2 mm para el espesor del aislamiento, el diámetro efectivo de la torre expuesto al empuje del viento es de 1.35 m. Si se supone para el viento una velocidad de 160 km/h, se obtiene un empuje de 120.32 kg/m² sobre el área proyectada por la torre en un plano normal a la dirección del viento [$P_c = 0.0047(160)^2$].

Por lo tanto,

$$P_c = 120.32 \text{ kg/m}^2$$
$$D_0 = 1.35 \text{ m}$$
$$H = 16.46 \text{ m}$$
$$P_w = 120.32 \times 1.35 \times 16.46 = 2\,674 \text{ kg}$$

Altura del cimiento = 1.80 m

$$L = 1.80 + \frac{16.46}{2} = 10.03 \text{ m}$$

$$M_f = 2\,674 \times 1\,003 = 2\,682\,022 \text{ kg-cm}$$
$$Z = 0.1016d^3 = 0.1016 \times 410^3 = 7\,002\,374 \text{ cm}^3$$

* W_t = peso de la torre y su cimiento.
W_a = peso de los accesorios y del agua necesaria para llenar la torre para hacer una prueba de carga.

De la Ec. 2

$$S_2 = \frac{2\,682\,022}{7\,002\,374} = 0.3830 \text{ kg/cm}^2$$

= carga máxima en el suelo debida al momento de vuelco.

La carga total máxima sobre el suelo puede calcularse con la Ec. 3, como sigue:

$$S = 0.5614 + 0.3830 = 0.9444 \text{ kg/cm}^2$$

Esta carga es satisfactoria, porque el suelo soporta con seguridad 0.98 kg/cm².

La carga mínima en el suelo debido a la carga muerta, antes de añadir las instalaciones interiores, escaleras, tuberías y líquido es:

$$\frac{57\,849}{13.92} = 4\,156 \text{ kg/m}^2 = 0.4156 \text{ kg/cm}^2$$

Esta es la carga muerta en las peores condiciones de estabilidad, y como es mayor que el esfuerzo producido por el vuelco ($S_2 = 0.3830$), el suelo que queda debajo de la cimentación estará trabajando en compresión en todos los puntos, indicando así que la cimentación es estable.*

Generalmente resulta que la primera suposición que se hace del tamaño de la cimentación no es correcta, y en este caso se hace otra y se repiten los cálculos.

Los cálculos que se hacen en el ejemplo anterior no completan el proyecto de la cimentación. En seguida deben calcularse los diferentes esfuerzos que se producen en el cimiento, para tener la seguridad de que son inferiores a los admisibles. Se registran los esfuerzos admisibles para el proyecto.[4, 8, 9] En estos esfuerzos está incluida la tensión diagonal producida por el empuje del suelo hacia arriba. Esta es una reacción excéntrica que tiende a romper el cimiento según una diagonal que tiene su origen al pie del pedestal del lado de sotavento. La cimentación debe resistir también la tendencia a cortarse en el borde inferior del pedestal del lado de sotavento. La fuerza cortante la produce la carga muerta y el empuje del viento y en su cálculo debe tomarse en cuenta la capacidad de carga del suelo.

Otros de los esfuerzos son: la flexión producida por la reacción hacia arriba del suelo que debe resistir el acero del refuerzo, el de adherencia entre el concreto y el acero (que no debe ser excesivo o el acero no desarrollará toda su resistencia), y los esfuerzos de compresión en la base de la torre. Estas y otras muchas consideraciones deberán analizarse cuidadosamente antes de que se pueda completar el proyecto. Es necesario hacer muchas suposiciones y tener mucho

* $S_1 - S_2 = +0.0326$ kg/cm² carga mínima en el suelo. El signo positivo indica compresión.

criterio. Las cimentaciones complicadas sólo deben proyectarlas ingenieros experimentados.

Las losas corridas

En el proyecto de las losas corridas influye el tipo del suelo. Debido a la gran superficie de las losas corridas la carga del suelo en las arenas es mucho menor que la capacidad de carga que se permite en ellas. Sin embargo, los materiales blandos como las arcillas tienen poca resistencia. En estos casos, excavando a mayor profundidad se encuentran estratos con mayor capacidad de carga.

La cargas excéntricas producidas por el viento en equipos apoyados simplemente, en grandes losas corridas, nunca son tan grandes como en las torres sin apoyar. Pero deben comprobarse estas cargas y estos esfuerzos. Sin embargo, lo más frecuente es que las cargas excéntricas producidas por los asentamientos diferenciales de las grandes losas corridas que soportan tanques puedan producir esfuerzos suficientes para agrietar la cimentación.

Los cimientos anulares de concreto rellenos de arena para los tanques deben proyectarse cuidadosamente. Las dimensiones del anillo deberán ser tales que la presión en el suelo bajo el fondo del tanque sea igual que en la base del anillo. Debido al tremendo peso que soportan los tanques de almacenamiento es indispensable conocer con precisión las características del suelo que queda debajo de toda la base del tanque. Solamente de esta manera pueden proyectarse apoyos que no sufran asentamientos diferenciales.

Cimentaciones de gran masa

Todavía no se ha inventado un método satisfactorio para proyectar cimentaciones de gran masa que resistan los esfuerzos cinéticos producidos por la maquinaria. Los fabricantes de equipo están preparados para proporcionar datos sobre las fuerzas desequilibradas y la vibración producida por su maquinaria. La experiencia[10] ha demostrado que la masa total del equipo más la del concreto del cimiento debe ser igual a 15 a 20 veces la fuerza dinámica del equipo animado de movimiento recíproco. Deberán obtenerse recomendaciones específicas para cada tipo de equipo.

Por supuesto, las cimentaciones pesadas deben comprobarse cuidadosamente respecto a las cargas que producen en el suelo. Las cimentaciones de gran masa necesitan piloteados con mayor frecuencia que los otros tipos.

Pilotes

Deben determinarse los esfuerzos en el cabezal de los pilotes de la misma manera que en las zapatas. Puede determinarse la carga

admisible en cada pilote por medio de una fórmula empírica, como se dijo antes, pero, en caso de duda, son preferibles las pruebas de carga.

Equipo menor

Las cimentaciones para equipo menor, como bombas, filtros y secadores con frecuencia se cuelan con la forma de sólidos rectangulares con lados rectos y sin salientes. El contorno del apoyo debe seguir el del equipo y la base del cimiento debe prolongarse hasta el estrato resistente. Los equipos de proceso pequeños tienen por lo general una relación masa-área pequeña, por lo que invariablemente la carga unitaria en el suelo es menor que su capacidad de carga, debido a que el área de cimentación es grande. Estas instalaciones rara vez requieren acero de refuerzo, a menos que lo necesiten para asegurar la unión de los colados de concreto consecutivos.

Por supuesto, sería posible recortar la base del cimiento, ya que no es necesaria una área tan grande para apoyarse. Sin embargo, en estos casos se produce tensión en el cimiento y es necesario el refuerzo de acero. El costo adicional del acero y de los moldes anula cualquier economía que se obtenga en el concreto.

Se han publicado numerosos artículos excelentes y manuales[1,2,4,6,7,8,9,10] además de los textos estándar sobre el proyecto de cimentaciones que describen los procedimientos que deben seguirse. La claridad y las presentaciones lógicas que se emplean en estas referencias, sin embargo, pueden hacer creer al novicio que el proyecto de las cimentaciones es fácil. Como en cualquier especialidad, los manuales, códigos y artículos se han escrito para reducir la rutina de proyecto. No obstante, en todas estas presentaciones queda implícito que las usarán proyectistas con experiencia o principiantes bajo la supervisión de un hombre experimentado que las use con el criterio necesario para obtener un proyecto seguro.

Se puede decir con seguridad que una planta no es mejor que su cimentación. Muchas falsas "economías" en las cimentaciones pueden producir muchos gastos innecesarios y una operación defectuosa de la planta.

REFERENCIAS

1. *A.C.I. Building Code* (ACI 318-51), American Concrete Institute, Detroit, 1951.

2. Boberg, Irving, *Petroleum Refiner, 30,* No. 4, 125 (1951).

3. *Concrete Piles,* Portland Cement Association, Chicago, 1951.

4. *C.R.S.I. Design Handbook,* 1st Ed., Concrete Reinforcing Steel Institute, Chicago, 1952.

5. *Design and Control of Concrete Mixtures,* 10th Ed., Portland Cement Association, Chicago, 1952.

6. Fork, C. H., *Petroleum Refiner, 30,* No. 3, 81 (1951).

7. Fork, C. H., *Petroleum Refiner, 31,* No. 11, 145 (1952).
8. Marshall, V. O., *Petroleum Refiner, 22,* No. 8, 101 (1943).
9. *Reinforced Concrete Design Handbook,* American Concrete Institute, Detroit, 1948.
10. Steven, George, *Power, 91,* No. 2, 111 (1947).
11. *Subsoil Investigations for Foundations,* Cat. B4, Raymond Concrete Pile Co., New York, 1953.

CAPITULO 23

ESTRUCTURAS Y EDIFICIOS

La moderna planta de proceso se localiza casi siempre completamente fuera de las ciudades y constituye un agudo contraste con las plantas totalmente encerradas de hace una década. Ahora sólo se encierran en edificios los centros de instrumentos de control, la maquinaria crítica y las operaciones que requieren atmósferas controladas. Lo que ha permitido hacer este cambio espectacular son los instrumentos para el control automático y los motores a prueba de intemperie y de explosión. En la actualidad, las estructuras más imponentes de una planta de proceso son los esqueletos gigantescos de acero que se usan para soportar equipo, que se opera cómodamente desde el cuarto de control con clima artificial, por medio de instrumentos automáticos.

Existen tres tipos de plantas de proceso: (*a*) las construidas con la estructura totalmente cubierta, que tienen un edificio convencional industrial o comercial; (*b*) las que tienen una estructura parcialmente cubierta que son del tipo de refugio simplemente techado, y (*c*) las de estructura descubierta constituidas por un soporte estructural al aire libre.

PLANTAS CON ESTRUCTURAS TOTALMENTE ENCERRADAS—EDIFICIOS

Los tipos de edificios que por lo general tienen las plantas de proceso son relativamente sencillos, parecidos a los de los talleres que se usan en las plantas de la industria pesada, con la excepción de que los edificios de las plantas de proceso son por lo común de construcción más ligera.

Las estructuras de un solo piso de los climas fríos de los Estados Unidos son generalmente estructuras de mampostería, con techos planos apoyados en muros y tabiques. Cuando se requieren varios pisos, la armazón puede ser de acero o de concreto reforzado con el techo y muros exteriores que quedan arriba del primer piso apoyados en esta armazón. Se usan los materiales más ligeros que se puedan obtener para los muros exteriores, para reducir la carga muerta, y se usan aislamientos para protegerlos de la intemperie en vez de varias hiladas de ladrillo y mampostería.

En los climas más suaves, se usan estructuras sencillas de acero para abrigar el equipo mecánico. En las estructuras de un solo piso son generalmente satisfactorios los techos de dos aguas con cubiertas metálicas de lámina corrugada o de asbesto cemento, con las que se forman también las paredes. Los techos planos son más comunes en los edificios de varios pisos.

Entre los edificios más comunes en las plantas de proceso podríamos mencionar los construidos para cubrir el equipo de proceso, los de oficinas, casas para vestidores, cafetería y centros recreativos, servicios médicos, laboratorios, talleres y bodegas.

Edificios para el equipo de los procesos

En climas fríos, algunas empresas han encontrado ventajoso colocar las unidades de proceso en edificios, pero la necesidad de abrigo en todos los climas está disminuyendo rápidamente. Sin embargo, algunas partes del equipo deben estar al abrigo cualesquiera que sean las condiciones del clima. Entre las partes mencionadas podríamos citar: (1) algunos aparatos mecánicos pesados como los generadores de energía eléctrica, (2) procesos que emplean calderas o depósitos para cantidades pequeñas, (3) equipo mecánico o de proceso en que se manejan materiales sólidos que deben protegerse de la intemperie, (4) quipo de empaque, (5) algunos tipos de filtros mecánicos, (6) tableros de control principal o maestro; y (7) cualquier equipo o proceso que requiera una atención constante en su operación.

En los climas cálidos, los edificios para algunos de los casos que se acaban de citar pueden estar abiertos en los costados, en los puntos en los que el viento no interfiera con el proceso. Los edificios completamente cerrados, como los cuartos de control, deberán tener clima artificial.

Edificios para oficinas

Al proyectar edificios para oficinas la forma más efectiva para estudiarlos es por medio de recortes con la figura a escala de escritorios, sillas, archiveros y máquinas de oficina. Se pueden acomodar de varias maneras estos recortes para obtener una vista en planta

del espacio propuesto para oficinas. También se puede estudiar de esta manera la calefacción y la ventilación, el alumbrado, el tránsito y las necesidades del equipo de oficina.

El buen equipo de oficina dispuesto de manera que produzca ineficacia o molestias constantes al personal, es de poco valor. Si, por ejemplo, varias personas deben trabajar juntas en un cuarto, los asientos deberán colocarse de manera de obtener el mayor aislamiento posible. Nunca dos personas sentadas deben quedar de frente. Sin tomar en cuenta la personalidad, estas disposiciones pueden crear problemas. En general, la separación de cada individuo, aunque sea por medios tabiques de vidrio, es mejor que la colocación en grupos.

El mismo piso en el que hay que colocar un grupo determinado debe estudiarse cuidadosamente. Supóngase que el departamento de ingeniería y el de compras van a alojarse en una estructura de dos pisos. La colocación de estos dos departamentos en el mismo edificio es funcional, porque en cualquier organización en que los haya es indispensable una gran colaboración. La pregunta siguiente es: ¿cuál departamento se va a colocar en la planta baja? El personal del departamento de compras despliega generalmente más actividad al tratar con firmas del exterior, que cualquier otro departamento, excepto el de ventas, y se puede anticipar que existirá una corriente continua de representantes de otras firmas. De lo anterior se deduce que el departamento de compras debe quedar en la planta baja, para facilitar la recepción de vendedores y visitantes.

Casas para vestidores

El proyecto de las casas para vestidores de los empleados es relativamente sencillo. Se contarán los empleados en los trabajos de diferentes clasificaciones, y se separará el personal que trabaja en labores limpias, del que trabaja en trabajos rudos de mantenimiento. A los capataces y supervisores por lo común se les destina un lugar separado.

Generalmente a cada empleado se le proporcionan dos gabinetes, uno para la ropa de trabajo y otra para la ordinaria; sin embargo, se pueden hacer muchos arreglos diferentes, según los sistemas de la compañía.

El problema de la ventilación de los gabinetes se resuelve mejor colocándolos en filas sencillas, en vez de formar filas dobles uniendo los gabinetes por los respaldos, lo que permite que los gabinetes se ventilen por el respaldo y por el frente aunque se requiera mayor superficie de pisos.

La altura del cielo raso en las casas para vestidores no debe ser menor de 3.60 m para que permita la mejor circulación del aire. Los baños de regadera deberán estar provistos de puertas y separa-

dos completamente por tabiques de las demás partes del edificio, para reducir la humedad lo más que sea posible.

La intensidad del alumbrado deberá mantenerse en 25 bujías por pie cuadrado para la mayor economía. Sin embargo, proyectando cuidadosamente los circuitos, se puede obtener mejor alumbrado con un costo ligeramente mayor.

En las plantas grandes se proporciona un servicio de lavado gratis, para la ropa exterior [monos (en España, *zahones*), ropa de trabajo, etc.] a cargo del encargado del cuarto de gabinetes. Cuando existe este servicio, se elimina cualquier excusa por falta de limpieza.

La calefacción se puede obtener por circulación de aire caliente en los climas más fríos o por radiadores colocados en el techo y en las paredes, o por medio de unidades de calefacción. Generalmente es conveniente contar con un sistema de circulación de aire forzada durante todo el año en todos los climas.

Cafetería y centro recreativo

Las cafeterías para las plantas industriales pueden estar equipadas con cocinas completas o pueden proyectarse para surtir órdenes pequeñas, comprando a casas especializadas las comidas completas. Las casas que abastecen de equipo a los hoteles auxilian en el estudio de los equipos de cocina y generalmente preparan listas del que recomiendan.

Deberá dejarse el espacio de almacén necesario para guardar artículos enlatados, artículos sueltos y verduras y, además, proveerse una cámara frigorífica para almacenar carnes. El mostrador de la cafetería se proyecta generalmente como una unidad, según su posición especial y servicio. La circulación debe estudiarse para evitar congestión. El espacio total necesario para las mesas puede estimarse de 0.9 a 1.4 m^2 por persona; sin embargo, el mejor método es hacer la distribución considerando mesas para cuatro personas. Si alguna vez se cambian por mesas mayores caben más personas.

Pueden reducirse los costos de los servicios recreativos combinando la zona destinada a ellos con la cafetería de la planta. Este arreglo ofrece muchas posibilidades. Proporciona más espacio si lo van a disfrutar grandes grupos de personal o de visitantes y permite mejorar el servicio si en estas ocasiones se van a servir alimentos. Se pueden usar mamparas corredizas que se pliegan contra las paredes para aislar algunos lugares. Una parte del espacio destinado a este servicio combinado puede convertirse en biblioteca o sala de lectura equipada con estantes y mesas de biblioteca. En alguna de las paredes puede disponerse una pantalla para la proyección de películas. Pueden adquirirse sillas plegadizas que se guardan cuando no se usan.

Deberán disponerse a un lado de la cocina servicios sanitarios para el personal de la cocina, y otros mayores (para cinco o diez

personas de cada sexo) convenientemente situados para el personal que se está atendiendo.

El proyecto de la calefacción, ventilación y de los servicios de acondicionamiento de aire dependerá de la organización de la compañía. Si el sistema de acondicionamiento de aire está bien proyectado y la estructura se ha aislado convenientemente, los costos de operación serán relativamente bajos. Con un control de zonas adecuado pueden aislarse todas las áreas, reduciendo por tanto la carga. En climas calientes y húmedos el acondicionamiento de aire es una necesidad.

La combinación de cafetería y centro recreativo representa el mínimo de servicios para comodidad de los trabajadores en las industrias de proceso. Muchas plantas construyen edificios como los de los clubes campestres, albercas, bibliotecas y proporcionan equipos para deportes. Cada compañía debe decidir la magnitud de las instalaciones recreativas necesarias para sus condiciones especiales. Las plantas situadas en las grandes áreas metropolitanas no las necesitan tanto como las situadas en zonas remotas.

Servicios médicos

El tamaño y ubicación de la planta son los factores principales que determinan el tipo de servicios médicos necesarios. Las plantas ubicadas cerca de las ciudades con servicios hospitalarios pueden utilizar el servicio de ambulancias, y sólo es necesario que dispongan de servicios para pacientes que tengan que estar encamados temporalmente. Sin embargo, se necesitan salas de espera, cuartos de examen y oficinas para el médico y la enfermera. A veces se dispone una combinación de cuarto de examen y sala de cirugía, si el hospital más cercano queda a una distancia que se recorra en una hora o dos.

Las salas de operación requieren servicios de anestesia, alumbrado especial, lavabos de hospital, recipientes estériles y esterilizadores. Todos los equipos deberán estar conectados a tierra para evitar explosiones. Para este objeto existen losetas especiales que quedan conectadas a tierra.

Es necesario un laboratorio de análisis clínicos si se considera que se van a efectuar muchos exámenes médicos extensos. Las firmas que venden artículos médicos recomiendan el equipo necesario para exámenes de rutina.

Laboratorios de las plantas de proceso

Los laboratorios para las plantas de proceso pueden proyectarse como laboratorios de control, laboratorios generales de la planta, y como laboratorios para investigación.

Laboratorios de control

En muchas plantas se pueden efectuar pruebas de control sencillas en la zona de operación. Generalmente será suficiente un fregadero con agua y aire, y otras conexiones para líquidos. El número de aparatos necesarios varía con la función.

Laboratorios generales para la planta

Además de los cuartos de trabajo del laboratorio necesarios para laboratorios generales de la planta, deberá disponerse de espacio para un jefe químico, para químicos ayudantes, para químicos de turno, biblioteca, cuarto de archivo, cuarto de suministros y bodega, vestidores y baños de regadera. Algunas veces es necesario disponer de un espacio aislado con aire acondicionado para el equipo para hacer análisis, como, por ejemplo, los espectrofotómetros. En algunos casos puede ser necesario un blindaje de plomo para pisos, paredes, puertas y cielos rasos de los cuartos en los que se guarden materiales radiactivos.

Las distribuciones de los equipos de los laboratorios de análisis siguen patrones convencionales. Varias firmas se especializan en la construcción de bancos para laboratorio y equipo conexo, y resulta más económico comprarles a ellas el equipo. El mobiliario, aunque de proyecto estándar, se hace en forma de unidades y puede disponerse de manera que satisfaga cualesquier necesidades.

La ventilación correcta del laboratorio constituye generalmente un problema que requiere un estudio considerable. Todo el personal de oficina, técnico, y dependientes y de los servicios no relacionados con el trabajo de análisis debe colocarse junto, en un extremo del edificio o en un piso separado. Si es posible elegir el piso, todo ese personal y sus servicios debe colocarse en la planta baja.

Si el laboratorio dispone de aire acondicionado, las dos áreas generales, de oficinas y del laboratorio de análisis, deberán tener sistemas de recirculación separados. Una alternativa podría ser disponer de recirculación en el área de oficinas y respiraderos o aire acondicionado 100% en el área de análisis. De esta manera se desperdicia aire frío. La cantidad de aire de recirculación puede reducirse si las operaciones en las que se desprenden gases tóxicos o desagradables se llevan a campanas de ventilación.

El alumbrado en las zonas donde se hacen análisis de laboratorio debe tener una intensidad elevada (de 75 a 100 bujías por pie^2) La elección de las lámparas depende del tipo de trabajo de laboratorio. En las zonas más peligrosas todo el alumbrado debe ser a prueba de vapor o de explosión.

Laboratorios de investigación

Los laboratorios de investigación de las plantas de proceso deben proyectarse de manera que su operación sea flexible, lo mismo que su distribución, porque pueden variar las maniobras que se hagan en un lugar. La investigación se puede dividir por comodidad en, a pequeña escala y en plantas piloto de investigación. Las operaciones a pequeña escala se pueden efectuar en laboratorios para dos personas, completos, con campanas de ventilación y todas sus instalaciones. Son necesarios soportes especiales para armar aparatos de vidrio como columnas de destilación, y escritorios cómodos y archivadores para cada investigador.

Las instalaciones para plantas piloto pueden estar situadas al descubierto o dentro de edificios ligeros prefabricados. Los edificios y las estructuras deben construirse sabiendo que es inevitable el tener que hacer cambios. Sin embargo, no deben menospreciarse las precauciones de seguridad, porque se sepa que el equipo es provisional.

Al proyectar las instalaciones para investigación, debe tratarse por todos los medios posibles de que las condiciones de trabajo estimulen el pensamiento creador. Para esto es necesario que los alrededores sean agradables, silenciosos y cómodos. Son indispensables la salas de conferencias y bibliotecas.

Talleres y bodegas

Los talleres y las bodegas ya no son los horribles, oscuros y sucios lugares en los que hay que trabajar. En la actualidad, los talleres mecánicos y bodegas de una planta de proceso se proyectan de manera que proporcionen el máximo de comodidad a los trabajadores para obtener de ellos la eficiencia máxima.

Las máquinas generalmente están pintadas con colores al pastel que no molestan la vista y permiten la rápida localización de botones y perillas. La mejor iluminación y combinación bien proyectadas de colores producen el mínimo de fatiga en los ojos.

Los nuevos talleres construidos en climas cálidos están provistos de refrigeración hasta en los lugares que se utilizan para soldar. Aparentemente, el mayor costo está justificado por la mayor eficiencia de los trabajadores.

Cualquier persona encargada del proyecto de talleres o bodegas debe estudiar cuidadosamente las necesidades de la planta en cuestión. Si es posible, el jefe de taller o de bodegas debe cooperar en todas las etapas de planeación.

Aspectos económicos de la construcción de edificios

Al proyectar edificios para las plantas de proceso, el proyectista se encuentra con frecuencia con el problema de que la administra-

ción trata de reducir costos. Los costos del equipo de proceso generalmente son fijos, y cuando debe reducirse el presupuesto total, el procedimiento común es tratar de hacer economías en los edificios o en sus servicios. En general, las economías obtenidas a base de reducir el tamaño de los edificios, o por la limitación de sus servicios, como alumbrado, calefacción, ventilación y sanitarios, solamente producen efectos deprimentes en la moral de los empleados.

Sin embargo, los costos de los edificios se pueden reducir usando materiales nuevos y mejores. Mientras que las características de los materiales de construcción básicos o fundamentales, como el concreto, el acero, la mampostería, no han cambiado apreciablemente en las últimas décadas, muchos cientos de materiales nuevos o nuevos usos de los conocidos se han desarrollado, los que reducen el costo de la mano de obra. Por ejemplo, el costo de las paredes exteriores puede reducirse mucho usando tableros metálicos ligeros en vez de mampostería. No sólo se obtienen economías en la mano de obra sino también en tiempo. Los tableros ligeros con aislamientos pegados pueden montarse en días, mientras que se necesitan semanas o meses para un muro de mampostería. Se pueden efectuar muchas economías semejantes cuando las organizaciones ingenieriles están alerta.

ESTRUCTURAS PARCIALMENTE CUBIERTAS—COBERTIZOS

Algunos de los equipos, como las grandes bombas y compresores de los procesos, no es necesario que estén encerrados en un edificio, pero es necesario protegerlos de la lluvia y de la nieve, para que el mantenimiento del equipo se pueda hacer en un lugar cubierto. Las diferentes piezas de los compresores tienen que manejarse por medios mecánicos cuando se desarman, debido a su gran peso. Por tanto, las estructuras de los cobertizos proporcionan el apoyo necesario a las grúas elevadas o monorrieles. Las tuberías de los compresores también son grandes y deben suspenderse. Aunque los cobertizos para los compresores no se proyectan necesariamente para soportar fuerzas horizontales producidas por las tuberías, es una costumbre generalizada proyectar los miembros estructurales principales para que soporten las cargas muertas de las tuberías de conexión.

Otros cobertizos que son comunes en las plantas de proceso incluyen los de las llenaderas, bodegas para barriles y para almacenar el equipo descartado.

ESTRUCTURAS DESCUBIERTAS—UNIDADES DE PROCESO AL DESCUBIERTO

En la mayor parte de las regiones de los Estados Unidos, especialmente al sur de la latitud 40°, es una costumbre común instalar

la mayor parte del equipo de proceso o de operación sin abrigo (Fig. 23-1). Deben disponerse abrigos de alguna clase para el personal de operación, pero los adelantos en instrumentación permiten colocar todos los instrumentos principales en un centro de control. En esta forma no sólo se proporciona abrigo a los operadores, sino que también se les permite observar todo el proceso desde un solo lugar.

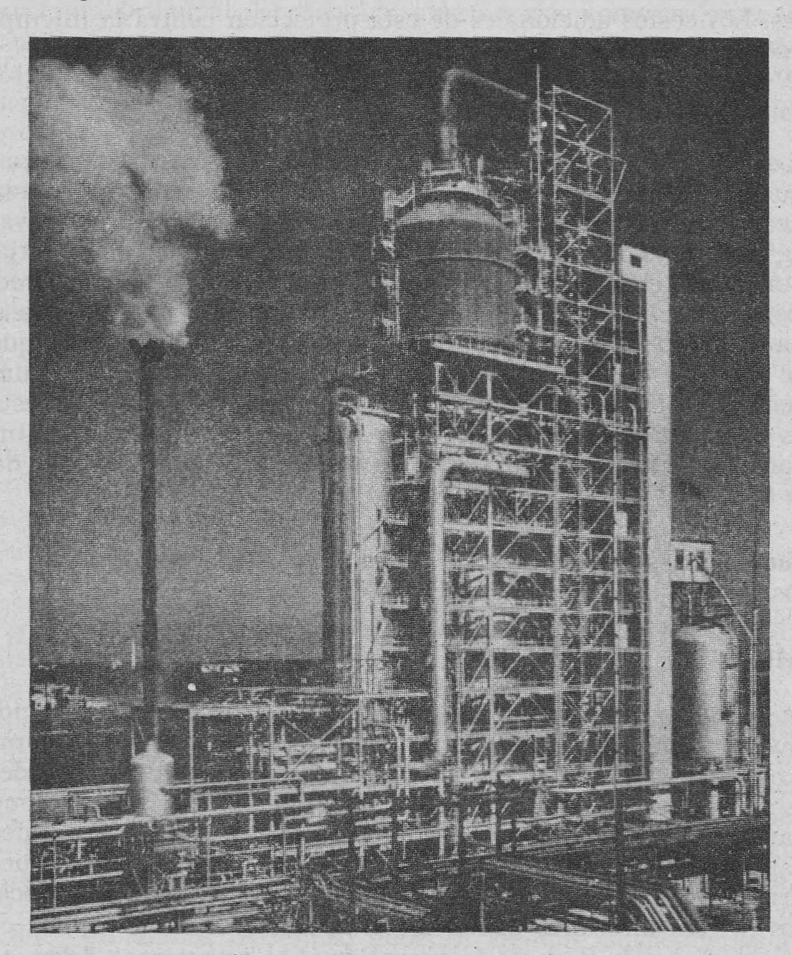


FIG. 23-1. Planta de proceso típica; unidad de descomposición térmica catalítica. (Cortesía de Humble Oil and Refining Company.)

La colocación del equipo al aire libre elimina el problema de calefacción y ventilación, reduce los costos iniciales eliminando muros y techos, y se simplifica y se reduce el costo de las operaciones de mantenimiento. Las plantas al aire libre, en general, son también plantas más seguras. La acumulación de vapores tóxicos, explosivos

o inflamables es rara en las plantas descubiertas. Por estas razones, casi todas las plantas de proceso, especialmente aquellas localizadas en regiones donde las condiciones climatológicas no son rigurosas, se proyectan para instalar al aire libre la mayor parte del equipo de proceso.

Las bombas, motores y otros equipos se han proyectado para operar satisfactoriamente cuando se exponen a todos los tipos de intemperies. Los costos adicionales de esta protección contra la intemperie son despreciables, en comparación con el costo de los edificios.

Tipos de soportes para el equipo

Los equipos descubiertos que quedan elevados arriba de la rasante, pueden soportarse con acero estructural o con concreto reforzado. El acero estructural es menos costoso en las estructuras de varios pisos, pero las columnas de concreto reforzado tienen la ventaja de requerir poco o ningún mantenimiento, porque no las afectan muchos de los vapores corrosivos comunes a las plantas de proceso. Además, el concreto no falla cuando queda sujeto al fuego, mientras que el acero debe protegerse mediante recubrimientos de concreto. Cuando es necesario que las estructuras sean a "prueba de fuego", las estructuras de concreto reforzado resultan más convenientes, especialmente para estructuras de un solo piso (de 3 a 5 metros arriba de la rasante).

Consideraciones generales para planear las estructuras de los equipos

Distribución

Además de soportar el equipo elevado, debe dejarse espacio en el nivel elevado para inspeccionar la operación y para mantenimiento. Los intercambiadores de calor y otros equipos que deben desarmarse de cuando en cuando, requieren más espacio que las simples cámaras o recipientes. Todos los equipos que deban abrirse o desconectarse periódicamente deben disponerse de manera que se puedan desarmar en el lugar, o para bajarlos al piso, y los equipos colocados en los niveles inferiores deben arreglarse de manera de evitar cualquier interferencia durante la operación. Las estructuras deben también proyectarse para las fuerzas que se producen cuando se está bajando el equipo.

Dondequiera que haya que desmantelar o levantar equipo pesado o sus partes, deberán instalarse aparatos elevadores. Algunas veces se instalan grúas de pórtico si se agrupan muchas piezas de equipo pesado que haya que desmantelar ocasionalmente. Para unidades aisladas del equipo se instala un monorriel con trole. Luego puede

conectarse un malacate movido por aire, eléctrico o de mano al trole cuando se quiera levantar algo.

La separación modulada o fija entre columnas, que se usa en los edificios para oficinas y otros de varios pisos, rara vez resulta práctica en las estructuras proyectadas para las plantas de proceso. Por el contrario, el peso y la disposición que se quiera dar al equipo gobernarán la distribución de las columnas. Por supuesto, las columnas de la estructura principal deberán ubicarse en ejes comunes para simplificar el proyecto y mejorar la estabilidad. Cuando se proyecta levantar varios pisos, si es posible, deberá dárseles igual altura, para simplificar el proyecto general y el de las escaleras, y para mejorar la estabilidad.

Pisos

Se construyen pisos de losa cuando las operaciones de mantenimiento del equipo elevado son numerosas, o cuando el personal de operación debe pasar mucho tiempo en el piso de operación. En las zonas que requieran solamente atención ocasional se usan placas de acero o pisos de rejilla. Debe preferirse la rejilla a las placas de acero en los lugares donde cae nieve, porque ésta se acumula sobre las placas de acero y crea un peligro. Las rejillas requieren un mínimo de limpieza y reducen el peso de la estructura, un factor que es importante cuando las estructuras son altas y están sujetas a cargas elevadas producidas por el viento.

Aditamentos

Todos los equipos deberán sujetarse firmemente a los miembros en que se apoyan. Los recipientes cilíndricos horizontales, tambores e intercambiadores de calor por lo general se sujetan solamente en dos puntos. Estos soportes son dos zapatas transversales soldadas al equipo. El equipo que cambia de dimensiones cuando opera se dispone de manera que uno de sus extremos se pueda mover en la dirección que le señala una guía. Las torres verticales grandes colocadas en una estructura, o arriba del piso, generalmente están apoyadas en el extremo inferior. En el equipo menor se utilizan orejas soldadas en su periferia. Como los intercambiadores de calor tienen cabezas desmontables en ambos extremos, deberán siempre suspenderse a lo largo de la parte central, para poder quitarles los cabezales.

Las tuberías de interconexión para los equipos calientes deben sujetarse y/o guiarse, de manera que los esfuerzos producidos por los cambios de temperatura, ya sea en la tubería o en los equipos, se controlen o absorban por la estructura en que se apoyan y no por el equipo. Como muchos de estos esfuerzos no se pueden calcular antes de completar el proyecto de la tubería, lo que se acostumbra es dejar sobradas las estructuras para el equipo de proceso, y no

retrasar el proyecto definitivo del acero estructural. Y además, como casi todos los procesos están sujetos a modificaciones, generalmente resulta más económico proyectar los miembros principales un poco más gruesos que lo necesario, en vez de proyectarlos para un mínimo absoluto como se acostumbra hacer en los edificios comerciales.

Bases para el proyecto de las estructuras de acero

El proyecto detallado de las estructuras de acero debe seguir las especificaciones del American Institute of Steel Construction,[8] y el del concreto reforzado las del American Concrete Institute.[1,7] Estos dos códigos pueden enmendarse de acuerdo con los requisitos de cada tipo especial de planta.

Las especificaciones que deben fijarse como base para el proyecto incluyen las siguientes:

I. Estructuras de 9 m de altura y mayores

1. Peso del equipo.
(*a*) Vacío; (*b*) en operación o lleno de los fluidos del proceso; (*c*) en prueba (llenos de agua o de otro fluido).

2. Cargas producidas por el viento; úsense las máximas previsibles y calcúlese la carga para cada una de las tres condiciones mencionadas en el No. 1.

3. Cargas vivas; cargas producidas por el personal o por el equipo en operación; cambios cíclicos del nivel de los fluidos en los recipientes, que debe comprobarse si se trata de pesos de muchas toneladas. También deben tomarse en cuenta las operaciones de mantenimiento. Las estructuras proyectadas para resistir el vuelco con el equipo en su lugar pueden resultar inadecuadas en las posiciones que toman cuando se desarman o con el mantenimiento. En resumen, la estructura debe ser autosuficiente en todas las condiciones.

II. Estructuras menores de nueve metros de altura.

Se aplican las condiciones establecidas en I.1 y I.3. Generalmente, las cargas producidas por el viento son muy pequeñas para estas estructuras.

III. Cargas admisibles o de proyecto y esfuerzos

			Notas
1. Producidas por el viento	150	kg/m²	Redúzcanse 60% para superficies cilíndricas
2. Cargas vivas			
a. Superficies de trabajo	730	kg/m²	
b. Pasillos y plataformas	490	kg/m²	
c. Pasarelas, puentes para peatones	250	kg/m²	
3. Tensión producida por los tubos de un intercambiador	150%	del peso de los tubos	
4. Cable de la grúa	150%	del peso del equipo	
5. Techo (sin equipo)	200	Kg/m² mínimo	

a. Techo con equipo	730 kg/m² mínimo	
b. Nieve	100 kg/m²	Súmese la nieve al viento
c. Viento	150 kg/m² para el Tipo I	Reducido por la fórmula de Duchemin
	100 kg/m² para el Tipo II	
6. Acero estructural		De acuerdo con el AISC
7. Acero de refuerzo (del concreto)		Según el ACI

Además de éstas, las especificaciones especiales para una instalación determinada deben contener varios requisitos específicos semejantes a los ilustrados en las especificaciones siguientes. Se numerarán todos los párrafos para su identificación o revisión posterior. Las prescripciones generales en las especificaciones con frecuencia producen malas interpretaciones, que generalmente dan por resultado aumentos de los costos. Todas las proposiciones deben examinarse para asegurarse que su significado lo entienden tanto el fabricante como el cliente.

IV. Requisitos varios

1. Cuando en los reglamentos de construcción locales se fijan valores mayores para el proyecto se utilizarán éstos. Cuando los requisitos de los reglamentos locales sean menores que los que se dan aquí, o permiten proyectos más ligeros, gobernarán los que aquí se dan.

2. Gálibos.

a. Gálibos para el ferrocarril. Ninguna estructura, ni equipos de cualquier clase se colocarán dentro de un rectángulo de 5.18 m de anchura por 6.70 de altura, su eje vertical es el que pasa por el centro de la vía, y su altura se mide a partir de la parte superior de los rieles del ferrocarril. (Nota: Muchos estados tienen reglamentos que fijan los gálibos. Las dimensiones que se dan aquí satisfacen a la mayor parte.)

b. Gálibos para las líneas de transmisión. La distancia mínima al suelo para alambres desnudos en soportes estructurales o que entren en edificios, o corran paralelos a estructuras, atravesando carreteras o vías del ferrocarril deberá ser de 8.53 m. La distancia libre horizontal de las estructuras deberá ser de 3.05 m. Los cables que entren a los edificios o corran dentro de los límites antes establecidos, deberán llevarse dentro de tubo conduit.

c. Gálibos para tuberías. Las tuberías elevadas en soportes estructurales o de otro tipo deberán tener una distancia libre vertical sobre las carreteras o los rieles del ferrocarril no menor de 7.60 m del punto más alto de la corona del camino o del hongo de los rieles del ferrocarril. La distancia libre horizontal para ferrocarriles deberá tener un mínimo de 2.60 m de la línea central de las vías. La distancia libre horizontal para caminos deberá ser cuando menos igual que para los ferrocarriles; sin embargo, las estructuras para soportar las tuberías no deberán estar a una distancia menor de 1.20 m de la orilla del pavimento. Si las coronas de los caminos llevan acotamientos o cunetas, las estructuras de los sopor-

tes deberán localizarse a 1.20 m cuando menos del talud más lejano de la corona.

La distancia vertical libre mínima arriba de la rasante en las tuberías que atraviesan las áreas generales de proceso, excepto en los cabezales adyacentes a los equipos, deberá ser de 3.70 m. La distancia vertical libre mínima en las áreas de operación deberá ser como mínimo de 2.30 m arriba de la rasante.

d. Gálibos estructurales. Los miembros estructurales secundarios o contravientos deberán quedar separados del equipo de proceso 45 cm cuando menos.

3. Fabricación.

a. Todas las conexiones de taller deberán ser remachadas.
b. Todas las conexiones de campo deberán ser remachadas.
c. Todos los pernos y remaches deberán tener una resistencia igual a 150% de la estipulada.
d. A todo el acero deberá quitársele las escamas y el óxido y dársele una mano de rojo de plomo y aceite antes de embarcarlo.

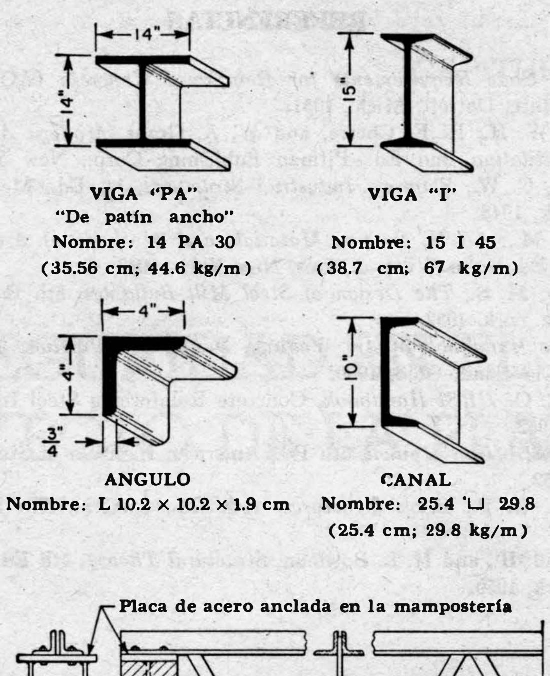
Estas son solamente especificaciones parciales para el proyecto y fabricación de acero estructural. El Manual of the American Institute of Steel Construction[8] contiene las especificaciones ordinarias que se usan en toda la industria de la fabricación de acero. También contiene los métodos establecidos que describen los criterios que usualmente siguen los fabricantes, si no se dan instrucciones específicas en las especificaciones.

PERFILES ESTRUCTURALES

Probablemente todos estamos familiarizados con el uso del acero en estructuras elevadas. Hace varias décadas se inventaron algunos perfiles que tienen el máximo de resistencia con el menor peso. Se propusieron fórmulas basadas en estos perfiles, y se tabularon sus propiedades para facilitar el trabajo del proyectista de estructuras de acero. En general, los perfiles comunes de acero "laminado", como vigas, columnas, canales y ángulos, son suficientes para proyectar casi todos los tipos de estructuras pesadas.

Con la aparición de la soldadura eléctrica de arco y su aceptación general en la industria, se construyen otros perfiles especiales y ligeros, como las viguetas de celosía (Fig. 23-2) que se usan como elementos de apoyo. Se usan otros perfiles formados con placas soldadas, que también se llaman perfiles compuestos, para fabricar estructuras de entramados de acero rígidas.

En la Fig. 23-2 aparecen los miembros estructurales comunes. Cada perfil se fabrica en varios tamaños diferentes. Por ejemplo, los "ángulos de lados iguales" se pueden obtener de 2.54 × 2.54 cm a 20.3 × 20.3 cm, de varios gruesos que hacen un total de 80 tamaños y pesos diferentes. Se fabrican 120 tamaños y pesos diferentes de ángulos de lados desiguales. El AISC[8] y los catálogos de los



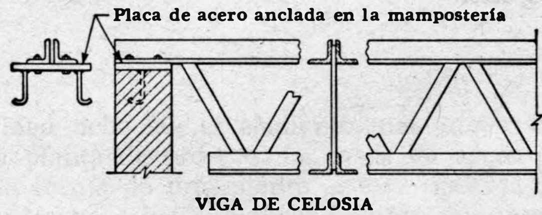


Fig. 23.2. Perfiles estructurales comúnmente usados

fabricantes describen los métodos de fabricación ordinarios y las propiedades de los diferentes perfiles estructurales de acero al carbono.

Además de utilizarse el acero al carbono, también se usan muchos otros materiales, como los varios aceros inoxidables, el aluminio, las aleaciones de aluminio, el magnesio, las aleaciones de magnesio, y muchas aleaciones de cobre. En la mayoría de los casos, estos materiales son más costosos que el acero al carbono, o requieren procesos de fabricación más caros.

Sin embargo, se han usado con ventaja económica aleaciones y materiales no ferrosos, cuando existen problemas de peso o de corrosión. El aluminio y sus aleaciones se han usado con muchas ventajas para tableros exteriores y en los marcos de las ventanas, y las estructuras de acero inoxidable se han usado con frecuencia en atmósferas especialmente corrosivas, debido a la rápida desintegración de otros materiales más baratos. Los aceros inoxidables tienen también mayor resistencia que el acero al carbono, y es posible lograr una reducción en el peso de un proyecto determinado.

REFERENCIAS

1. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI-51), American Concrete Institute, Detroit, Mich., 1951.

2. Carrier, W. H., R. E. Cherre, and W. A. Grant, *Modern Air Conditioning, Heat and Ventilating,* 2nd Ed., Pitman Publishing Corp., New York, 1950.

3. Dunham, C. W., *Planning Industrial Structures,* 1st Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1948.

4. Gay, C. M., and H. Parker, *Materials and Methods of Architectural Construction,* 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1943.

5. Ketchum, M. S., *The Design of Steel Mill Buildings,* 5th Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1932.

6. *Procedure Handbook of Arc Welding, Design and Practice,* 9th Ed., Lincoln Electric Co., Cleveland, Ohio, 1950.

7. Reese, R. C., *CRSI Handbook,* Concrete Reinforcing Steel Institute, 1st Ed., Chicago, Ill., 1952.

8. *Steel Construction Manual,* 5th Ed., American Institute of Steel Construction, New York, 1952.

9. Stoddard, R. P., *Brick Structures,* 11th Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1946.

10. Sutherland, H., and H. L. Bowman, *Structural Theory,* 4th Ed., John Wiley & Sons, New York, 1950.

CAPITULO 24

LA SEGURIDAD EN EL PROYECTO DE LA PLANTA

La seguridad debe ser el elemento más importante en el proyecto de una planta de proceso. La masa de acero que se modela hasta darle la forma de una planta, estará operada finalmente por seres humanos cuya salud y bienestar habrá que proteger.

El no tomar en cuenta la seguridad en el proyecto de una planta de proceso es equivalente a la negligencia criminal. Todos los ingenieros proyectistas deben sentir la responsabilidad que entraña el ejecutar un proyecto seguro. Deberán hacerse la siguiente pregunta: "¿Estaría yo dispuesto a operar este equipo como está proyectado?" Si la respuesta es "no", o si el "sí" es débil, deben buscarse y corregirse las causas de la incertidumbre. Siempre que sea posible, el proyectista deberá discutir su proyecto con los operadores y con los ingenieros encargados de la seguridad de la planta. Estas personas conocen a fondo lo que es la seguridad y podrán dar muy buenos consejos.

RIESGOS EN LAS PLANTAS DE PROCESO

Los riesgos que hay que considerar en el proyecto de cualquier planta de proceso pueden agruparse en forma aproximada en tres categorías principales: incendios y explosiones, higiénicos y mecánicos. La mayoría de los procesos químicos son potencialmente peligrosos, porque en ellos se producen materiales inflamables y explo-

sivos. El proyecto del equipo para estas plantas deben dictarlo las características de los materiales que se procesan. Nunca se debe confiar a la propia memoria las características de combustión ni los límites de explosión de los materiales. Debe hacerse una investigación cuidadosa de estas características de los materiales que se van a manejar en la planta antes de empezar los cálculos de proyecto.

Varios productos químicos constituyen peligros definidos para la salud. La respiración continuada y/o el contacto con la piel por mucho tiempo de materiales como el benceno y el tetracloruro de carbono pueden producir daños permanentes en la salud y hasta la muerte. Es asombroso que muchas personas con conocimientos científicos no saben los riesgos que representan para la salud algunas sustancias químicas comunes. Aunque existen referencias excelentes sobre toxicología industrial que pueden usarse como guías, todo lo relativo a las sustancias químicas, excepto cuando se trate de las más comunes, deberá consultarse con un toxicólogo industrial competente antes de desarrollar las técnicas para su manejo.

Los riesgos mecánicos incluyen a todos aquellos que crea el equipo en movimiento y la disposición del equipo y de las estructuras.

Estas clasificaciones son algo arbitrarias y se sobreponen, pero sirven para hacer resaltar los riesgos más importantes que existen en las plantas de proceso, que crean o son capaces de crear condiciones de trabajo inseguras.

El proyecto cuidadoso combinado con programas bien planeados para la prevención de accidentes produce maravillosos índices de seguridad. Los fabricantes de tetraetilo de plomo, por ejemplo, tuvieron un problema insólito debido a la naturaleza venenosa de las materias primas y del producto. Teniendo presente este problema antes de proyectar la planta se creó un clima de precaución que influyó en todas las decisiones del proyecto. El resultado fue obtener un índice envidiable de seguridad en la operación.

Fuentes de información

Muchos métodos para obtener seguridad no son más que la aplicación del sentido común. El problema consiste en reconocer las situaciones peligrosas antes de que se introduzcan en el proyecto de la planta. Básicamente consiste en la determinación de los riesgos potenciales. Además de los innumerables libros publicados sobre seguridad e higiene industrial,[1, 2, 6, 11, 12, 13] las numerosas dependencias interesadas en la seguridad y prevención de incendios han editado muchos manuales, códigos y publicaciones semejantes que ayudan a identificar los riesgos potenciales. Se da en seguida una selección de estas publicaciones:

I. Incendios y explosiones

1. La National Fire Protection Association; 60 Batterymarch Street, Boston 10, Mass.; organización sin fines comerciales, técnica y didáctica; pública:

a. Normas: adoptadas en gran parte de los Estados Unidos como bases para la construcción. Se han publicado los siguientes sumarios de las normas.

(i) National Fire Codes for Flammable Liquids, Gases, Chemicals and Explosives.
(ii) National Fire Codes for the Prevention of Dust Explosions.
(iii) National Fire Codes for Building Construction and Equipment.
(iv) National Fire Codes for Extinguishing and Alarm Equipment.
(v) National Electrical Code.

b. Publicación trimestral de la National Fire Protection Association: información al día sobre incendios y su prevención.

c. NFPA Handbook of Fire Protection: manual de referencia.

2. National Board of Fire Underwriters, 85 John Street, New York 7, New York; organización pedagógica, objetiva y de Ingeniería, sostenida con el fondo de las compañías de seguros contra incendios publica:

a. Normas para la protección contra incendios, muchas de las cuales se basan en las de la NFPA.

b. Informes sobre investigaciones.

c. Informes especiales en desastres inusitados. (La mayor parte de estos datos se envían gratis usando papel con membrete de la compañía. Se pueden obtener sugestiones y consejos sobre ciertas fases de los problemas sobre protección contra incendios que no se tratan en los códigos ni en las normas.)

3. Otras organizaciones de seguros: The Factory Insurance Association, 555 Asylum Street, Hartford 2, Conn.; Associated Factory Mutual Fire Insurance Company, 184 High Street, Boston 10, Mass. También operan laboratorios de investigación y publican normas.

4. Dependencias Federales, Washington, D. C.

a. 1. U. S. Bureau of Mines—informes de investigaciones y recomendaciones, minerales, polvos y aceites.

b. U. S. Dept. of Agriculture; explosiones de polvo e incendios.

c. U. S. Dept. of Labor, Division of Labor Standards; métodos de seguridad recomendados para varias industrias.

d. National Bureau of Standards; peligros de incendio e investigaciones sobre resistencia al fuego.

e. U. S. Public Health Service; publicaciones de higiene industrial.

5. National Safety Council, 20 N. Wacker Drive, Chicago, Ill.; principalmente educación sobre seguridad. Trabajos de investigación dirigidos (no comerciales).

6. Underwriters Laboratories, Inc., 207 E. Ohio Street, Chicago 11, Ill.; (no comerciales). Equipo de pruebas (eléctricas, protección contra incendio, etc.) para obtener seguridad. Listas de equipo probado y aprobado publicadas anualmente con suplementos cada dos meses.

7. Leyes; federales, estatales y locales relativas a la protección contra incendios y edificios. Muchas se refieren a los diferentes preceptos de los reglamentos NFPA.

8. Compañías de seguros y oficinas locales y estatales para la prevención de incendios que pueden proporcionar una asesoría valiosa.

9. American Petroleum Institute, 50 W. 50th Street, New York, N. Y.; publica boletines sobre la *protección contra incendios en las refinerías*.

II. Higiene industrial.

1. Manufacturing Chemists' Association; publica datos sobre seguridad química para el manejo y uso seguro de muchas sustancias químicas.

2. National Safety Council; publica folletos sobre métodos de higiene y seguridad relativos al manejo de varias sustancias químicas.
3. American Industrial Hygiene Association; publica revistas trimestrales técnicas sobre higiene industrial.
4. U. S. Bureau of Mines, Washington, D. C.; polvos y vapores tóxicos.
5. Atomic Energy Commission, Washington, D. C.; materiales radiactivos.
6. Mellon Institute, Industrial Hygiene Foundation, Pittsburgh, Pa.; investigación.
7. Division of Industrial Hygiene, U. S. Public Health Service, Washington, D. C.; publicaciones de varios tipos y asesoría.
8. American Medical Association, Committee on Physical Agents of a Hazardous Nature.
9. Compañías de Productos Químicos; publican informes sobre el manejo seguro de sus propios productos. Por ejemplo, los productores de tetraetilo de plomo, recomiendan y proporcionan el proyecto completo de equipo para manejar este producto.
10. Sax, N. I. *Handbook of Dangerous Materials,* Reinhold Publishing Corp., N. Y. (1951); indica las propiedades peligrosas, tratamiento y antídotos; también da consejos para el manejo seguro de numerosos materiales tóxicos que se encuentran en el comercio.

III. Riesgos mecánicos.

1. Fabricantes de equipo; recomendarán procedimientos seguros para hacer las instalaciones.
2. U. S. Department of Labor, Division of Labor Standards; publicaciones sobre los procedimientos para obtener seguridad y recomendaciones para la industria.
3. National Safety Council; métodos seguros, recomendaciones; presentadas en folletos.
4. Reglamentos para la construcción de depósitos, tanques, tuberías y equipo eléctrico:
   a. Reglamentos de la ASME y de la API-ASME para obtener presión sin utilizar fuego.
   b. Reglamento de la ASME para la construcción de calderas.
   c. Reglamento para las tuberías de presión de la American Standards Association.
   d. API Standard No. 12C y 12E para tanques de almacenamiento.
   e. National Electrical Code.
5. Compañías de seguros contra riesgos; publican datos útiles que pueden auxiliar en el proyecto de plantas seguras.

DISTRIBUCION DE LA PLANTA

Los antecedentes de seguridad de una planta dependen parcialmente de la disposición de las diferentes unidades y de la localización del equipo dentro de esas unidades. Por esta sola razón es por lo que hay que considerar los aspectos de la seguridad desde las primeras etapas del proyecto de la planta.

Topografía y clima

Al elegir el lugar para una planta deberán estudiarse cuidadosamente la topografía y los fenómenos meteorológicos. Las zonas mon-

tañosas presentan ciertos riesgos inherentes. El derrame de los tanques o las fallas de los depósitos pueden enviar miles de litros de materias inflamables a las zonas vecinas. Si el área es montañosa, estos materiales pueden alcanzar una área mayor y si encienden producen una rápida propagación del fuego.

Deben considerarse los vientos dominantes en la distribución de la planta de manera que los gases tóxicos e inflamables puedan disiparse sin poner en peligro las vidas o la comodidad del personal de la planta o de los habitantes de las zonas vecinas.

Deberá analizarse la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como las inversiones. Normalmente, la temperatura atmosférica disminuye con la altura. Durante los periodos de inversión sucede lo contrario. En estos casos, la atmósfera inferior permanece estancada, y el humo y los vapores tóxicos quedan estacionados sobre la superficie de la tierra y crean peligros extremos para la salud. El desastre de DeNora, Pennsylvania, en el que mucha gente murió, fue causado por uno de estos fenómenos. Cualquier zona en la que se produzcan inversiones frecuentes, que duren más de dos o tres días, debe rechazarse como lugar posible para una planta de proceso.

División de la planta en unidades

Las unidades de operación de una planta de proceso deben separarse, no sólo para obtener una operación más eficiente y un mejor mantenimiento, sino por razones de seguridad. Separando las unidades de proceso es posible evitar la propagación de los incendios y las explosiones.

La división de la planta en manzanas, como las ciudades, tiene muchas ventajas. Generalmente, las manzanas están separadas por calles que facilitan el acceso a todas las partes de la planta. La anchura de estas calles puede variar de 15 a 30 m. Deberán evitarse las calles cerradas para que se pueda llegar a cualquier parte de la planta por dos lados diferentes.

Aunque los caminos proporcionan un servicio definido a la planta, pueden también constituir un riesgo para la seguridad si no están convenientemente dispuestos. Muchos grandes incendios y explosiones han sido producidos por vehículos que han golpeado tanques o depósitos que contenían materias inflamables. Al planear las calles debe tomarse en cuenta esta posibilidad.

En la Tabla 24-1 se hacen algunas sugestiones respecto a la separación entre las unidades de proceso y otras instalaciones de la planta. Si se quisiera hacer una lista completa resultaría demasiado voluminosa, porque cada tipo de unidad de proceso debe considerarse individualmente.

TABLA 24-1. SEPARACIONES MINIMAS QUE SE ACONSEJAN PARA LAS UNIDADES DE PROCESO PELIGROSAS

Descripción del riesgo	Distancia a las unidades de operación adyacentes, m
1. Inflamabilidad ordinaria y presiones de bajas a medias	7.60–22.90
2. Alta inflamabilidad y alta presión	30.50–45.70
3. Calderas y hornos de encendido directo	30.50–45.70
4. Chimeneas de purga con mechero	30.50–61.00
5. Servicios de carga	30.50
6. Caminos públicos y ferrocarriles	30.50
7. Torres de enfriamiento	30.50
8. Tanques de almacenamiento*	22.90–45.70

* Las distancias mínimas entre tanques de almacenamiento se dan en el National Fire Codes.[10] Siempre que sea posible deberá usarse una distancia equivalente a 1 o 1½ veces el diámetro del tanque mayor.

Servicios

La producción y distribución de servicios en una planta de proceso tienen una función tan importante, que deben localizarse tan lejos como sea posible de las unidades de operación. Durante las emergencias producidas por los incendios y explosiones, es imperiosa la operación continua de la planta de fuerza, de la estación de bombeo del agua y de la unidad generadora de vapor. Las llamas descubiertas y los equipos que producen chispas son comunes en las plantas de fuerza motriz y en las salas de calderas; si se localizan cerca de alguna unidad que procesa productos inflamables constituyen un riesgo real.

Edificios

Las oficinas de la planta, los talleres mecánicos y los laboratorios deben localizarse tan alejados como sea posible de las unidades de operación. No existe ninguna necesidad real de que las oficinas estén cerca de las unidades de proceso, y como las llamas y las chispas son comunes a los talleres y a los laboratorios, también se aconseja separar estos edificios de las unidades de proceso.

Las bodegas y los servicios de carga deben localizarse en los linderos de la propiedad de la planta, para que tengan fácil acceso de los caminos públicos y para que queden tan lejos como sea posible de las zonas de posible peligro.

Distribución del equipo

Una de las reglas principales para la distribución del equipo es que cualquier operador debe disponer cuando menos de dos rutas

de escape desde cualquier punto de una unidad. En los lugares extremadamente peligrosos se construirán resbaladeros de escape para alejarse con rapidez del lugar.

Como cualquier zona limpia con buen mantenimiento con frecuencia es una zona segura, el equipo se debe distribuir de manera que permita hacer con facilidad el mantenimiento y la limpieza.

El equipo debe localizarse a bastante distancia arriba de la altura media de un hombre o a una altura mucho menor, porque si se pone a una altura aproximada a la estatura común puede producir heridas en la cabeza. Como regla general, cuanto más sencilla es la distribución, tanto más segura será la unidad. Las distribuciones sencillas facilitan la pronta acción en emergencias.

Muros contra incendio

Cuando es necesario utilizar separaciones menores que las que se consideran seguras, los muros de protección se pueden construir de concreto. También se usan muros altos de este tipo para proteger al personal del equipo de operación de lo que pueda explotar o causar grandes incendios.

Deberán construirse barreras o muros contra incendio alrededor de todos los tanques de almacenamiento que contengan materias inflamables. Estos muros son especialmente necesarios cuando las materias inflamables tienden a derramarse al hervir. En estos casos, el muro contra incendio deberá tener la altura necesaria para que cubra todo el contenido del tanque, evitando de esta manera que el fuego se propague a otras partes de la planta. Las reglas y sugestiones para la construcción de muros contra incendios se describen en detalle en las referencias.[5, 8, 9]

Las unidades en que se procesan grandes cantidades de materias inflamables con frecuencia se pavimentan y se encierran en muros de poca altura, de 30 a 60 cm. Si un depósito se rompe, estos muros detendrán el material inflamable y evitarán la propagación del fuego. En algunos de los lugares donde se hacen procesos se puede proyectar el sistema de drenaje de manera que evacue rápidamente estos derrames. En este caso no son necesarios los muros contra incendio.

EL PROYECTO MECANICO Y LA SEGURIDAD

Para que la construcción sea segura, todos los proyectos mecánicos deberán hacerse de acuerdo con los reglamentos vigentes. Sin embargo, no siempre se especifican en los reglamentos todos los detalles necesarios para obtener un proyecto seguro. Algunos de los sistemas más comunes se dan en seguida en forma de lista de revisión para los proyectistas.

A. Depósitos y tanques

1. Selección cuidadosa de materiales que resistan la corrosión. Usense márgenes de corrosión adecuados en los materiales que se espera que se corroan.

2. Dispóngase el número suficiente de registros de inspección y de mano, para inspección y mantenimiento, y oriéntense de manera que tengan acceso fácil.

3. Evítense los niples de rosca para las boquillas pequeñas. Usense coples para 6 000 lb.

4. Las boquillas mayores de 1½" (38.1 mm) deberán ser de ceja. Para alta presión úsense boquillas de ceja para todos los tamaños.

5. Inspección cuidadosa durante y después de la fabricación; un inspector competente puede hacer mucho para evitar la falla de los depósitos.

a. Inspección de materiales.

b. Inspección de mano de obra (especialmente de la calidad de las soldaduras).

c. Supervisión de la toma de radiografías y de la eliminación de esfuerzos secundarios.

6. Los tanques de almacenamiento a la presión atmosférica deben estar provistos de respiraderos (para que admitan o descarguen vapor al aumentar o disminuir la presión, debido al cambio de temperatura o del nivel del líquido).

a. Usense válvulas de respiración.

b. Usense tanques con techos de flotador para los líquidos volátiles.

c. Conéctense todos los espacios de vapor de los tanques herméticos a un solo tanque que sirva como depósito de gas. Sin embargo, pónganse válvulas de seguridad en todos los tanques.

7. Deben preferirse los indicadores de nivel automáticos de los tanques completamente encerrados; las escotillas de nivel manuales exponen al operador a riesgos innecesarios.

B. Intercambiadores de calor

1. Si se requieren válvulas de bloque a la entrada y a la salida de un intercambiador, instálese una válvula de seguridad del lado frío, para evitar una dilatación térmica excesiva. Han ocurrido muchas explosiones debido a estas dilataciones.

2. Deberán ponerse drenes suficientes para el mantenimiento.

3. A todos los espacios que vayan a llenarse de fluidos en un intercambiador se les hará una prueba individual.

4. Si las unidades se van a apilar, deben apilarse durante el proceso de prueba.

5. Si constituye un peligro el que se mezclen los fluidos del cuerpo y de los tubos, deberá ponerse un cuidado extremo en el proyecto y mano de obra.

C. Equipo en movimiento (bombas, etc.)

1. Pónganse guardas en todos los acoplamientos, bandas, y sistemas de propulsión de cadenas.

2. Déjese el espacio necesario entre unidades para atenderlas en forma cómoda y segura.

3. Aparatos automáticos para evitar las sobrecargas, el exceso de velocidad, y algunos otros dispositivos son buenas inversiones en maquinaria como los compresores.

4. Dispositivos de protección como coladeras en las bombas y separadores de líquidos para los compresores son esenciales para la operación segura.

D. Tuberías

1. Deben preferirse las tuberías al aire libre. Pueden ser elevadas o colocarse al nivel del suelo sobre durmientes. Las tuberías enterradas constituyen un riesgo porque no se pueden localizar las fugas fácilmente.
2. Si se instalan las tuberías en zanjas, deberán ponerse barreras contra incendio y drenes a intervalos regulares.
3. La buena distribución de tuberías y válvulas es importante para una operación segura.

a. De modo especial, las válvulas grandes deben tener un fácil acceso de las plataformas. Aproximadamente 2.10 m es la distancia máxima de la línea central a la plataforma. Cuando la altura es mayor deben operarse con cadenas.
b. Usense válvulas de bloque dobles en los equipos peligrosos que deben desconectarse mientras continúa operando el resto. Una pequeña válvula indicadora entre los bloques indica las fugas.
c. Usense tuberías largas en los patios para evitar congestión, para que en caso de incendio se pueda aislar cualquier porción del resto cerrando una válvula de bloque.
d. El espacio libre vertical para las tuberías elevadas debe ser aproximadamente 4.60 m arriba de los caminos; 2.00 m arriba de las plataformas; 2.75 arriba del suelo. Si se tiene que poner una tubería a una altura menor de 2.00 m, póngase mucho más abajo y constrúyase una pasarela sobre ella.
e. Las válvulas para el abastecimiento de combustible deben quedar lejos.
f. Las válvulas de emergencia para vaciar deben localizarse a una distancia segura del equipo que vacían; de preferencia detrás de una pared gruesa o edificio.
g. Las válvulas que descargan en tanques abiertos instálense de manera que el operador pueda manejarlas sin exponerse indebidamente a los vapores o salpicaduras.

4. Las válvulas de retención tienen fugas; si son intolerables, póngase una válvula de bloque además de la de retención.
5. Evítense las válvulas de codo.
6. Por razones estructurales, evítense los tubos de diámetro menor de 1 plg en las tuberías elevadas.
7. Deben ponerse drenes en los puntos bajos de las tuberías y respiraderos en los altos. Usense de 3/4" o mayores.
8. Las tuberías, especialmente las usadas para extinguir incendios, deberán formar circuitos cerrados.
9. Fórmense circuitos cerrados con las tuberías de vapor y úsense válvulas de bloque, para que en caso de falla de una parte del sistema, pueda conducirse vapor de varias direcciones.
10. Para algunos materiales peligrosos puede ser necesario disponer de sistemas de drenaje separado. La ventilación de estos sistemas debe proyectarse cuidadosamente.
11. En todos los sistemas de drenaje superficiales es necesario poner barreras contra incendio, para evitar la propagación del fuego.
12. Las tuberías deberán probarse a presión antes de ponerlas en operación. Debe tenerse cuidado para no sujetar a esfuerzos excesivos algunas piezas del equipo o las cimentaciones durante las pruebas hidrostáticas.

E. Equipo eléctrico y conexiones a tierra

La instalación segura y proyecto del equipo eléctrico se describen cuidadosamente en el *National Electrical Code*. El problema requiere la atención de ingenieros electricistas competentes, que deberán estar informados de los riesgos que existen en cada parte de la planta.

1. Conviene disponer de medios para desconectar a control remoto el equipo de operación, además de los sistemas de arranque locales.
2. Los elementos críticos como el sistema de interruptores y transformadores deben localizarse tan lejos como sea práctico de las unidades de operación.
3. Identifíquense los conductos subterráneos dándole un color al concreto de las cubiertas.
4. Protéjanse del calor excesivo los conductos exteriores.
5. Instálense fuentes de energía de emergencia.
6. La planta deberá estar bien alumbrada en todas sus partes para que los operadores puedan evitar choques y caídas.
7. La electricidad estática y los rayos constituyen riesgos reales para la operación de la planta de proceso. Nada puede evitarlos, pero es posible protegerse. Vigílense las acumulaciones de electricidad estática y sus descargas en los casos siguientes:

   a. En la maquinaria en movimiento (bandas, transportadores, etc.)
   b. En las corrientes de fluidos o de polvo.
   c. En los seres humanos.
   d. En los rayos.

Se hace la protección conectando correctamente a tierra todo el equipo en las zonas donde se prevea la electricidad estática. Cuando todo el equipo metálico descansa en cimientos de concreto, por ejemplo, deberá conectarse a tierra. Las instrucciones para conectar en forma correcta el equipo se dan en el Handbook of Fire Protection,[8] los National Electrical Codes, y varias publicaciones del gobierno.[9] (Véase también fuentes de información.)

F. Acero estructural

1. Protéjase de las fallas debidas al fuego cubriéndolo con concreto hasta el nivel del apoyo principal, o instalando rociadores de agua de emergencia para enfriar el acero en el caso de incendio.
2. Evítense las interferencias del acero estructural con las tuberías y el equipo. Algunas veces en el campo las interferencias se remedian quitando o "cortando" porciones de acero, reduciendo al hacerlo la resistencia de la estructura.
3. Deben colocarse plataformas con una anchura mínima de 75 cm en todos los lugares de operación o inspección. Se prefieren de 90 cm a 1.10 m en los lugares de mantenimiento alrededor de los registros de inspección.
4. Son preferibles las escaleras ordinarias a las de mano y se necesitan cuando menos dos en las unidades grandes. Usese una pendiente suave, de 45° o menor, y anchuras de 90 cm o mayores.
5. En las escaleras de mano es necesario poner jaulas de seguridad a distancias de 4.60 a 6.00 m.
6. Son necesarios barandales alrededor de todas las plataformas y escaleras.
7. Son necesarios rodapiés (de 15 cm de altura) alrededor de los bordes de las plataformas, para evitar que le caigan objetos al personal.

G. Edificios

1. Es indispensable que la construcción sea a prueba de fuego en los lugares peligrosos.
2. A menos que sea absolutamente necesario, el equipo de proceso se construirá descubierto. La operación de las plantas al aire libre es mucho más segura.
3. Constrúyanse puertas para explosiones, para las que puedan ocurrir.
4. Instálense rociadores automáticos cuando resulte práctico.
5. Son necesarias cuando menos dos salidas.

H. Aislamiento

1. Aíslense todas las tuberías calientes con las que el personal pueda quedar en contacto. Son necesarios aislamientos de aproximadamente 2.54 a 3.8 cm de magnesia para protección del personal. Por supuesto, son necesarios espesores mayores para la conservación del calor. Pueden conseguirse especificaciones detalladas de los fabricantes de aislamientos.
2. Aíslense tramos de los conductores a los instrumentos críticos y utilícese conduit para instalaciones eléctricas en los lugares donde el calor sea excesivo o donde se puedan producir incendios.

VENTILACION

Cuando el equipo de proceso tenga que colocarse en el interior de un edificio, la ventilación es un problema fundamental. Debe tomarse en cuenta tanto la toxicidad como la inflamabilidad de un material al proyectar un sistema de ventilación.

Concentraciones tóxicas

Los materiales como la anilina, los halógenos, el ácido fluorhídrico y el fosgeno son tóxicos a concentraciones tan pequeñas como 5 ppm, mientras que las concentraciones tóxicas de sustancias tan familiares como el amoniaco, el benceno, el cloroformo, el ácido sulfhídrico y el tetracloruro de carbono varían de 20 a 100 ppm. Se han publicado en forma de tablas las concentraciones máximas admisibles de varias sustancias químicas.[2] Sin embargo, advertiremos a los que consultan estas tablas, que la investigación sobre las propiedades tóxicas de algunos materiales está incompleta, y, conforme se van obteniendo nuevos datos, los valores de las concentraciones admisibles pueden aumentarse o disminuirse.

Límites de inflamabilidad

Se han publicado datos sobre los límites de inflamabilidad de gases y vapores y sobre los métodos de determinarlos.[3, 11, 15] Los límites de inflamabilidad se llaman superiores e inferiores. El límite inferior representa la cantidad mínima de material que puede sostener la propagación de las llamas cuando se mezcla con el aire, y el superior la cantidad mayor. A estos límites de inflamabilidad determinados experimentalmente los afecta el tipo de aparato que

se use. De modo especial, los aparatos demasiado pequeños producen límites de inflamabilidad muy estrechos, y los resultados obtenidos con estos equipos deben usarse con precaución. Los límites de inflamabilidad de las mezclas de varios gases combustibles y aire pueden determinarse con la ecuación siguiente que se ha comprobado experimentalmente:

$$L_m = \frac{100}{\frac{C_1}{L_1} + \frac{C_2}{L_2} + \frac{C_3}{L_3} + \cdots}$$

siendo: L_m = límite de inflamabilidad de la mezcla. Porcentaje de mol (superior o inferior)

L_1, L_2, L_3 = límites de inflamabilidad (superior o inferior) de los gases 1, 2 y 3, en porcentaje de moles (por ejemplo, moles de gas/mol de gas más aire)

C_1, C_2, C_3 = % de mol en aire y base libre inerte de gases 1, 2 y 3

Las unidades de esta expresión son compatibles, porque la suma de los términos en C/L tiene unidades de moles de aire más moles de combustible por mol de combustible.

Grado necesario de ventilación

Conociendo la cantidad de vapor peligroso liberado por unidad de tiempo y la concentración admisible de la contaminación de un recinto, se puede calcular la cantidad mínima de aire fresco por unidad de tiempo por medio de una ecuación sencilla.

$$\frac{r_V}{r_A + r_V} = \frac{L_A}{100}$$

siendo: r_V = moles de contaminante que entran por unidad de tiempo

r_A = moles de aire fresco por unidad de tiempo

L_A = límite inferior de inflamabilidad o límite tóxico, tomando el menor, en % de moles de contaminante por mol de aire más contaminante

Debe evitarse la costumbre de expresar la capacidad de ventilación en renovaciones de aire por hora. Si 15 renovaciones de aire son las correctas para una instalación, no se deduce que esta misma proporción produzca resultados satisfactorios en un recinto de tamaño menor.

$$\left(\text{Renovaciones de aire} = \frac{\text{Cantidad de aire, en m}^3\text{ por hora}}{\text{Volumen del recinto en m}^3\text{/renovación}}\right)$$

Ventilación local

La ventilación general de las salas puede completarse con ventilación local sobre el equipo que emite los vapores dañosos. Estas unidades locales se disponen como sistemas de extracción, y consisten en campanas proyectadas para recibir la cantidad máxima de vapor o polvo, sin interferir con la operación o atención del equipo. Las campanas pueden colocarse sobre los filtros, en las empaquetaduras de las bombas, alrededor de los equipos de trituración o molido, y en otras instalaciones semejantes.

Presión de aire positiva

Con frecuencia conviene mantener una presión más elevada en un lugar peligroso que en los cuartos que lo rodean o el exterior. Por ejemplo, el equipo eléctrico, que no puede proyectarse para operar a prueba de explosiones, puede instalarse en una zona peligrosa, colocándolo en un cuarto con presión de aire positiva.

Expulsión de gases tóxicos por medio de gases inertes

El uso de gases inertes constituye otra valiosa ayuda para la ventilación. Los gases inertes se fabrican quemando gases combustibles en hornos convencionales o, de preferencia, en generadores de gas inerte especialmente proyectados. El gas puede usarse para purgar tanques y depósitos de vapores tóxicos e inflamables, antes de purgar con aire para que los operarios puedan entrar al depósito.

Muchos hombres han muerto después de entrar a equipos mal purgados. Todas las plantas de proceso que manejan materiales tóxicos o inflamables deben estar equipadas con generadores de gas inerte o inyectores de aire o vapor para expulsar los vapores tóxicos e inflamables de los tanques y depósitos en los que deba entrar el personal.

Ventilación para comodidad

La ventilación y el acondicionamiento de aire, además de expulsar las materias tóxicas e inflamables en los edificios de operación, es también importante para la comodidad y la moral de los trabajadores. Los climas calientes y húmedos o los extremadamente fríos pueden considerarse seguros para los trabajadores que operan en ellos, pero su eficiencia y su destreza se reducen en estas condiciones, y pueden producirse accidentes simplemente a causa de la fatiga, de la incomodidad o de la moral deprimida.

Proyecto de los sistemas de ventilación

Debe tenerse un cuidado extremo al localizar los ductos de entrada y los de salida para evitar que el aire fresco vaya a dar directa-

mente a los ductos de salida. Debe conocerse el grado en que están mezclados los gases tóxicos o inflamables con el aire de la sala para decidir la localización de los tubos de salida.

Si es posible, los vapores extraídos de las salas deben tratarse antes de liberarlos a la atmósfera circunvecina. Los separadores centrífugos o ciclones, columnas de lluvia o de relleno, filtros de

TABLA 24-2. CONDICIONES EN LAS QUE SE REQUIEREN REDUCTORES DE PRESION

Condición	Base para el proyecto
Interrupción en el abastecimiento de agua de enfriamiento de una torre de destilación fraccionada	Vapor equivalente a su capacidad máxima total
Interrupción en el reflujo de la torre de destilación fraccionada	Gasto máximo posible equivalente a su capacidad máxima total
Entrada de materias extrañas extremadamente volátiles	Calcúlese el gasto de vapor basándose en la vaporización instantánea
Exposición al fuego	1. Calcúlese la entrada de calor tomando como base los datos de PAW, que en forma de ecuación son aproximadamente como sigue: $\log q = (0.923) \log S - 1.7$ siendo q = calor aplicado al recipiente en millones de kcal/hr; S = área de la superficie expuesta a las llamas en m^2
	2. Usese para el área de la superficie expuesta

Depósitos horizontales con diámetro menor de 6 m	La mitad de la superficie cilíndrica más el área de las cabezas
Depósitos horizontales con diámetro mayor de 6 m	Toda el área hasta una altura de 6 m arriba del terreno
Depósitos verticales con altura menor de 6 m	Toda el área lateral más la cabeza del fondo
Depósitos verticales con altura mayor de 6 m	El área hasta los 6 m

En recipientes aislados (con aislamiento de 5 cm o mayor) redúzcase el calor de entrada en 20%

TABLA 24-2. CONDICIONES EN LAS QUE SE REQUIEREN REDUCTORES DE PRESION (*Continuación*)

Condición	Base para el proyecto
Exposición al fuego (*continuación*)	3. Calcúlense los vapores generados $W = \frac{q}{H}$ siendo W = lb/hr de vapores H = calor latente (Alternativa) $W = \frac{\left(\frac{q}{S}\right)(S)}{H}$ Usese $q/S = 22\,000$ Esta alternativa es mucho más conservadora que el método PAW. Otros métodos dan valores intermedios
Válvulas cerradas	Cantidad de fluido que sale del recipiente en condiciones normales de operación
Dilatación térmica de los líquidos confinados	$W = \frac{Bq}{C_p}$ siendo B = coeficiente de dilatación térmica, $1/T$ q = calor aplicado al fluido C_p = capacidad calorífica W = lb/hr
Dilatación térmica de los gases confinados	Calcúlese el aumento de volumen usando las leyes de los gases
Cargas de calor excesivas durante la operación anormal	Vapor generado por la entrada adicional de calor

aire, y depuradores electrostáticos pueden mejorar la calidad de los gases haciéndolos menos perjudiciales. En cualquier caso, deben descargarse los gases del edificio en la misma dirección de los vientos dominantes. Los ventiladores de techo del tipo giratorio permiten hacer la descarga en esta forma aun con vientos variables.

APARATOS PARA REDUCIR LA PRESION

No resulta práctico proyectar el equipo de proceso para todas las condiciones que puedan surgir en situaciones anormales. Sin embargo, afortunadamente las situaciones anormales se pueden resolver con el uso de reductores de presión, como válvulas reguladoras o discos de seguridad. El sistema reductor de presión requiere un es-

tudio cuidadoso. En los sistemas mal planeados, se instalan demasiados o muy pocos, o los que se instalan no se colocan en el lugar correcto.

Sylvander y Katz[14] han preparado una excelente discusión sobre el proyecto y construcción de los sistemas reductores de presión. En la Tabla 24-2 se dan algunas de las aplicaciones típicas de los reductores de presión, aconsejando la base de proyecto para cada aplicación. Esta tabla se basa en parte en el trabajo de Sylvander y Katz.

Descargas de válvulas reductoras y discos de seguridad

La capacidad de descarga de una válvula reductora o de un disco de seguridad se calcula con las fórmulas siguientes para los vapores y los líquidos. La fórmula para el vapor se ha deducido suponiendo un gas ideal, expansión adiabática, un valor de 1.001 para la relación de los calores específicos, y el vapor saliendo a la velocidad del sonido. Los valores más elevados de la relación de calor específico dan descargas menores; y, por tanto, la fórmula simplificada que se da en seguida es conservadora. La fórmula para líquidos se basa en la ecuación sencilla para los orificios. Los fabricantes proporcionan nomogramas y tablas fáciles de usar, que facilitan los cálculos de los tamaños de las válvulas reductoras de presión y de los discos de seguridad.

Descargas de las válvulas reductoras y de los discos de seguridad De vapor:

$$W = 315APC\sqrt{\frac{M}{T}}$$

siendo: A = área del orificio, en plg²
P = presión en el sentido contrario a la corriente, lb/plg²abs
C = coeficiente para boquillas, 0.97 para válvulas reductoras (10% de acumulación), 0.81 para discos de seguridad (consúltese al fabricante)
M = peso molecular
T = temperatura absoluta en grados F en el sentido contrario a la corriente

De líquidos:

$$Q = 38AC\sqrt{\frac{\Delta P}{p.\ esp.}}$$

Q = gasto en gpm
A = área del orificio, plg²
C = coeficiente de descarga, 0.40 para las válvulas reductoras (10% de acumulación), 0.61 para los discos de seguridad
p. esp. = peso específico

Sistemas reductores y de rápida descarga

La correcta evacuación de los materiales descargados por los dispositivos automáticos o por medio de válvulas de rápida descarga operadas a mano es una fase importante en la seguridad de la planta. Las válvulas reductoras situadas en la parte superior de las torres altas de destilación fraccionada pueden con frecuencia descargarse a la atmósfera. Sin embargo, no siempre es posible utilizar esta forma de hacer la descarga, cuando se trata de grandes cantidades de vapores inflamables o líquidos que deben descargarse a una distancia segura de la planta para evacuarse. Los productos descargados por las válvulas reductoras y las de rápida descarga pueden conectarse a una sola tubería que vaya a la sección de eliminación (horno de fosa, chimenea para quemar gases, o torre de enfriamiento).

Si existe una superficie grande lo suficientemente alejada de la sección de proceso y el humo no molesta a la comunidad circunvecina, pueden emplearse hornos de fosa con llamas piloto para la eliminación de líquidos y gases inflamables. Al desarrollarse las zonas industriales y las plantas, sin embargo, el horno de fosa resulta cada vez más inconveniente.

Mecheros

Los mecheros se construyen de tubo o de placa para calderas, de diámetro suficiente para que satisfagan la caída de carga total requerida en el sistema y deben ser lo suficientemente altos, para que los vapores quemados no constituyan un daño o riesgo y que se difundan rápidamente en los vientos dominantes. La altura de los mecheros varía de 30 a 60 m.

Se instala una llave de purga o separador de arrastres, para separar los líquidos contenidos en la corriente de vapor. Los gases pasan luego por una válvula de tambor, cuya entrada se prolonga debajo del agua o aceite contenido en el tambor. El gas burbujea a través del líquido y entra luego al mechero. La trampa de líquido así formada evita que el fuego se propague fuera del mechero. Los últimos 2.50 o 3.00 m superiores del mechero se construyen mejor con un acero de aleación, como el acero inoxidable tipo 304, porque este tramo superior se calienta mucho y el acero ordinario no soporta la elevada temperatura.

A la salida del mechero se pone una flama piloto que arde continuamente encendiendo así los gases cuando escapan. Para evitar que se apague la llama del piloto se alimenta con una mezcla de gas y aire, que produce una llama azul. Sin embargo, es difícil ver esta llama desde el suelo, por lo que se usa también un pequeño quemador luminoso, para que un observador parado en el suelo pueda darse cuenta fácilmente si falla el piloto. El piloto se enciende con

una bujía eléctrica colocada dentro del tubo por el que pasa la mezcla de gas y aire a la salida del mechero. En esta forma, se propaga la llama al piloto. Se usan otros métodos. En uno se emplea una serie de chorros de gas colocados dentro de un tubo abierto a intervalos regulares empezando en el lugar de encendido y terminando en el piloto.

Torres de enfriamiento

Pueden descargarse grandes cantidades de líquidos espesos en una torre de enfriamiento, donde se condensa la mayoría de los líquidos. La pequeña cantidad de vapor que quede puede descargarse a la atmósfera o a un mechero, según su cantidad. Los líquidos espesos pueden recuperarse en un separador de aceite.

Tuberías de la válvula reductora

Deben instalarse las válvulas reductoras de manera que tengan un acceso fácil para atenderlas. Pueden emplearse dos válvulas, para poder limpiar una mientras la otra queda en servicio. En estas instalaciones se ponen llaves de paso* del lado de la entrada a la válvula reductora con un mecanismo de interconexión, que al mismo tiempo que se abra una llave se cierre la otra.

La tubería entre la válvula y los recipientes debe ser tan corta como sea posible, para evitar grandes pérdidas de presión. La caída de presión en la tubería de succión no debe exceder de uno por ciento de la presión admisible para lograr toda la reducción. La tubería de descarga debe estar proyectada para evitar una caída de presión excesiva, y en la mayor parte de las instalaciones, la caída de presión no debe exceder del 10% de la presión a la que se ajusta la válvula. El diámetro del tubo nunca debe ser menor que el de la salida de la válvula reductora. La tubería de descarga debe estar bien apoyada en todos los puntos donde se produzcan esfuerzos, especialmente los de impacto de los gases de descarga.

Las válvulas reductoras ordinarias y los cabezales de descarga deben tener una pendiente suave hacia los separadores de líquidos para que éstos puedan escurrir del sistema. No pueden tolerarse las trampas de líquido en las tuberías de descarga. Las tuberías de descarga a la atmósfera deben estar provistas de protección contra la intemperie, para evitar la acumulación de agua en el tubo vertical. También son necesarios humedecedores de vapor que descarguen a la atmósfera para que los gases que salgan puedan diluirse, evitando así que enciendan.

Aunque los sistemas reductores y los de rápida descarga son vitales, el exceso de precaución en su proyecto puede dar por resul-

* También se usan válvulas de compuerta.

tado un sistema costoso y estorboso. Debe considerarse por separado cada sección y clase de equipo, y la condición o condiciones anormales más probables como base para el proyecto. Un estudio cuidadoso por lo general revela que no ocurrirán simultáneamente todas las anormalidades posibles en una pieza del equipo o en una sección de la planta. La experiencia desempeña una parte importante en esas decisiones y el ingeniero debe asesorarse y aconsejarse por el departamento de seguridad de su empresa.

EQUIPO CONTRA INCENDIOS

Los procesos para apagar incendios en las plantas son un tipo muy especializado de la lucha contra los incendios, y la manera de hacerlo se ha aprendido como resultado de una larga experiencia. Afortunadamente, la mayor parte de los reglamentos que ayudan en la selección y aplicación del equipo contra incendios han sido publicados por instituciones como el American Petroleum Institute, la National Fire Protection Association, la National Board of Fire Underwriters y otras (véase la sección sobre fuentes de información). Al mismo tiempo que aprovecha estos datos, el ingeniero proyectista debe obtener el consejo de personas especialmente entrenadas en este arte antes de empezar el proyecto de los servicios contra incendios para una planta de proceso.

El agua como agente para extinguir incendios

El agua continúa siendo el agente principal para extinguir incendios, y su uso ha aumentado después de la introducción de los chiflones que producen niebla y de los sistemas rociadores. Un chorro de agua continuo sobre un líquido inflamable con frecuencia produce más daño que provecho, pero el uso de una niebla o neblina de agua que tiende a sofocar el fuego, además de producir enfriamiento ha resultado extremadamente eficaz.

La gran eficacia del agua para apagar incendios sugiere que la planeación de los sistemas de distribución del agua para incendios debe estudiarse con cuidado. Estos sistemas requieren invariablemente bombas contra incendios para reforzar la presión normal del agua, aumentándola hasta obtener las elevadas presiones que requieren las mangueras contra incendios y los sistemas rociadores. Las bombas para este objeto deben elegirse cuidadosamente y deberán tener sistemas impulsores de emergencia, para asegurar su funcionamiento en las condiciones más adversas. El sistema impulsor doble típico de una bomba contra incendios consiste en un motor eléctrico y un motor de gasolina. El motor de gasolina se usa cuando falla la corriente eléctrica.

Otros agentes para apagar incendios

Otro método común de apagar incendios rápidamente cuando están confinados en espacios pequeños es sofocándolos. Lo que puede hacerse usando espuma o gases inertes como el bióxido de carbono. También es valioso para este objeto el vapor de agua y es particularmente útil para apagar pequeños incendios alrededor de los hornos.

Cierre de emergencia de las válvulas

Las válvulas para impedir la salida en las tuberías que llevan materias inflamables deben localizarse de manera que puedan operarse en caso de incendio. En algunos incendios puede ser preferible simplemente interrumpir la circulación del material inflamable y dejar que arda el que ya se ha escapado. En esta forma se evitan las grandes acumulaciones de gas o vapor explosivo.

Extinguidores portátiles

Además de las instalaciones permanentes de hidrantes contra incendio, de los sistemas de rociado automático y de los sistemas automáticos de extinción de bióxido de carbono, deberán distribuirse en toda la planta de proceso extinguidores portátiles, porque con frecuencia se pueden apagar con facilidad los incendios pequeños usando rápidamente un extinguidor. La mayor parte de los incendios grandes comienza como pequeñas conflagraciones y la atención inmediata a un incendio pequeño evita con frecuencia un desastre.

Selección del equipo de extinguidores de incendios

El ingeniero proyectista debe ser cauto al utilizar las tablas publicadas que indican el método exacto para apagar los diferentes materiales inflamables. Dan consejos generales que no son específicos para todos los casos. Estas tablas son útiles como guías, pero deberá obtenerse la asesoría de instituciones autorizadas.

Cuando se proyecta una planta nueva todos los materiales que constituyen un riesgo de incendio en la operación de la planta deben estudiarse cuidadosamente. Deberán examinarse los relatos de incendios anteriores de plantas semejantes para poder elegir y colocar el equipo de extinción inteligentemente. El National Board of Fire Underwriters, la National Fire Protection Association, la Associated Factory Mutual Insurance Agency, y otras asociaciones parecidas proporcionarán información segura de este tipo.

Sistema de alarma de la planta

Debe instalarse un sistema de alarma en todas las plantas de proceso para poner alerta al personal en caso de incendio. En la

mayor parte de las plantas el sistema de alarma puede ser manual, aunque en algunas zonas de la planta que requieren normalmente poca atención, son preferibles las alarmas automáticas.

REFERENCIAS

1. Armistead, George, Jr., *Safety in Petroleum Refining and Related Industries,* John G. Simmonds and Co., Inc., New York, 1950.
2. Brandt, A. D., *Industrial Health Engineering,* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1947.
3. Burgess, M. J., and R. V. Wheeler, *J. Chem. Soc., 99,* 2013 (1911).
4. Duggan, J. J., *Chem. Eng., 58,* No. 6, 125 (1951).
5. *Fire Protection in Refineries,* 3rd Ed., American Petroleum Institute, New York, 1941.
6. Gafafer, W. M., *Manual of Industrial Hygiene,* U.S. Public Health Service, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 1943.
7. *Heating, Ventilating and Air Conditioning Guide,* Vol. 31, Amer. Soc. Heating Ventilating Engrs., New York, 1953.
8. Moulton, R. S., *NFPA Handbook of Fire Protection,* Crosby-Fiske-Forster, 10th Ed., National Fire Protection Assoc., Boston, 1948.
9. *National Bureau of Standards Handbook H40,* Supt. of Documents, Washington, D.C., 1945.
10. *National Fire Codes,* National Fire Protection Association, Boston (1945).
11. Patty, Frank A., *Industrial Hygiene and Toxicology,* Interscience Publishers, Inc., New York, 1948.
12. Reigeluth, R. J., *Safety and Economy in Heavy Construction,* McGraw-Hill Book Co., New York, 1933.
13. Robinson, C. S., *Explosions, Their Anatomy and Destructiveness,* McGraw-Hill Book Co., New York, 1944.
14. Sylvander, N. E., and D. L. Katz, *The Design and Construction of Pressure Relieving Systems,* Engr. Research Inst., Bulletin No. 31, Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Mich., 1948.
15. Thornton, W. M., *Phil. Mag., 33,* 140 (1917).

PARTE IV

CONSTRUCCION DE LA PLANTA

Cuando se ha completado el proyecto de la planta, puede comenzar su construcción. En este punto la mayor parte de la responsabilidad recae en el superintendente de construcción. Sin embargo, el proyectista debe conservar un interés activo en las operaciones de la construcción para interpretar, siempre que sea necesario, la intención de los ingenieros proyectistas y actuar como conexión entre el personal de construcción y el de proyecto. Para este trabajo se requiere tener algún conocimiento de los métodos de construcción.

CAPITULO 25

CONSTRUCCION

Cuando comienza la construcción, el trabajo del ingeniero proyectista ha terminado prácticamente y la terminación de la obra depende del departamento de construcción. Sin embargo, el ingeniero proyectista no puede ser complaciente respecto a las técnicas y problemas de construcción. Por el contrario, debe tener un conocimiento tal de los métodos a emplearse, que pueda prever y advertir las posibles dificultades de construcción cuando la planta se encuentre aún en las etapas de proyecto.

Para entender los problemas de construcción, el proyectista debe tener algunos conocimientos sobre su planeación, sobre el personal y las relaciones obreropatronales, así como también de las operaciones prácticas de la construcción.

PLANEACION DE LA CONSTRUCCION

Los dibujos de proyecto y las especificaciones dan al departamento de construcción información detallada sobre lo que se va a construir, pero no prescriben los métodos de montaje. Mucho antes de comenzar el montaje, por tanto, el superintendente de construcción y su personal estudian en forma preliminar los datos de ingeniería y los modelos a escala de la planta que se va a montar. De esta manera, se puede escoger la posición más ventajosa de las grúas y del equipo elevador; puede elegirse el equipo principal de construcción, y los métodos de construcción más prácticos que se determinan para cada pieza principal del equipo. Esta planeación preliminar en el gabinete se traduce siempre en costos de construcción menores.

PERSONAL DE CONSTRUCCION

La organización de campo o de construcción tiene dos clasificaciones para el personal, personal de oficina para la oficina de campo y los operarios que ejecutan directamente el trabajo de construcción.

Las operaciones de rutina de oficina en un trabajo de construcción consisten en las compras locales, recepción de materiales y operaciones contables, preparación de la lista de raya semanal y la formulación de registros de costos para cada parte del proyecto.

El personal ejecutivo para la construcción de una obra consiste en un gerente de la obra o superintendente, o ambos en las obras grandes, asistentes de los superintendentes, capataces generales y subcapataces, y un jefe de oficina.

Los principales de la organización de campo pueden ser de tres a cinco supervisores generales incluyendo al superintendente. Los trabajos de oficina requieren de ocho a quince empleados. La siguiente organización es la típica que podría usarse en un proyecto grande con costo de diez millones de dólares o más.

1. Gerente de la obra
2. Superintendente
3. Ayudante del superintendente
3.1. Ingeniero de campo (civil)

4.0

4.01 Sobrestante general
4.02 Sobrestante de sección
4.03 Superintendente de tuberías
4.04 Capataz de plomeros
4.05 Capataz de carpinteros
4.06 Capataz de herreros
4.07 Capataz de caldereros
4.08 Capataz de albañiles
4.09 Capataz de obras de concreto
4.10 Capataz de electricistas
4.11 Capataz de mecánicos
4.12 Capataz de pintores
4.13 Capataz de obras de asbesto
4.14 Capataz de hojalateros
4.15 Capataz de fierreros para refuerzo de concreto.

5.0

5.01 Jefe de oficina
5.02 Jefe de contabilidad
5.03 Jefe de tomadores de tiempo
5.04 Agente de compras
5.05 Almacenista
5.06 Recepcionista
5.07 Tomadores de tiempo
5.08 Secretarias y taquígrafas
5.09 Mecanógrafas, tableristas

Las brigadas de ingeniería algunas veces trabajan en el lugar de la obra, pero generalmente trabajan por separado de las operaciones de construcción y no se consideran aquí.

Los títulos del No. 4.0 son también clasificaciones de los sindicatos. Los sindicatos pretenden que se utilice determinado personal para cada tipo de trabajo. Cuando un personal determinado completa su trabajo se da de baja, pero la mayor parte de los operarios de una planta de proceso se emplea durante toda la obra.

La mayor parte del trabajo de construcción se ejecuta con personal sindicalizado. Los trabajadores de construcción por lo general se consideran como eventuales y se emplean de modo permanente sólo cuando han llegado a la categoría de supervisor.

Las operaciones de rutina de oficina en un trabajo de construcción consisten en las compras locales, recepción de materiales y operaciones contables, preparación de la lista de raya semanal y la formulación de registros de costos para cada parte del proyecto.

El personal ejecutivo para la construcción de una obra consiste en un gerente de la obra o superintendente, o ambos en las obras grandes, asistentes de los superintendentes, capataces generales y subcapataces, y un jefe de oficina.

Los principales de la organización de campo pueden ser de tres a cinco supervisores generales incluyendo al superintendente. Los trabajos de oficina requieren de ocho a quince empleados. La siguiente organización es la típica que podría usarse en un proyecto grande con costo de diez millones de dólares o más.

1. Gerente de la obra
2. Superintendente
3. Ayudante del superintendente
3.1. Ingeniero de campo (civil)

4.0

4.01 Sobrestante general
4.02 Sobrestante de sección
4.03 Superintendente de tuberías
4.04 Capataz de plomeros
4.05 Capataz de carpinteros
4.06 Capataz de herreros
4.07 Capataz de caldereros
4.08 Capataz de albañiles
4.09 Capataz de obras de concreto
4.10 Capataz de electricistas
4.11 Capataz de mecánicos
4.12 Capataz de pintores
4.13 Capataz de obras de asbesto
4.14 Capataz de hojalateros
4.15 Capataz de fierreros para refuerzo de concreto.

5.0

5.01 Jefe de oficina
5.02 Jefe de contabilidad
5.03 Jefe de tomadores de tiempo
5.04 Agente de compras
5.05 Almacenista
5.06 Recepcionista
5.07 Tomadores de tiempo
5.08 Secretarias y taquígrafas
5.09 Mecanógrafas, tableristas

Las brigadas de ingeniería algunas veces trabajan en el lugar de la obra, pero generalmente trabajan por separado de las operaciones de construcción y no se consideran aquí.

Los títulos del No. 4.0 son también clasificaciones de los sindicatos. Los sindicatos pretenden que se utilice determinado personal para cada tipo de trabajo. Cuando un personal determinado completa su trabajo se da de baja, pero la mayor parte de los operarios de una planta de proceso se emplea durante toda la obra.

La mayor parte del trabajo de construcción se ejecuta con personal sindicalizado. Los trabajadores de construcción por lo general se consideran como eventuales y se emplean de modo permanente sólo cuando han llegado a la categoría de supervisor.

Los sindicatos de empleados de la construcción hacen arreglos con el contratista que fija los salarios de los trabajadores, las horas de trabajo, las tarifas para los tiempos extra, y las condiciones de trabajo. En general, el sindicato controla al empleado, su empleo y su trabajo específico así como los métodos de trabajo de la zona. Los sindicatos tratan constantemente de mejorar las condiciones de trabajo, los salarios y el tiempo de empleo. La duración del empleo se aumenta limitando las funciones de cada personal para poder conservar un número mayor de tipos de trabajadores en toda la obra. La mayor parte de los problemas con los trabajadores de construcción provienen de este sistema, que a menudo es la causa de que un gremio que trabaja mal, arbitrariamente tome el trabajo de otro. El resultado es una disputa a la que se llama disputa jurisdiccional.

Las disputas jurisdiccionales y las relaciones laborales

La disputa jurisdiccional es un desacuerdo entre dos o más gremios sobre cuál debe ejecutar ciertas funciones o partes de la obra. La solución razonable a estas cuestiones parecería ser la de los convenios mutuos entre varias organizaciones laborales sin la participación del patrón. El patrón no está necesariamente interesado en que uno u otro gremio ejecute una operación, a menos que se aumenten los costos de montaje o que la calidad del trabajo desmerezca.

A pesar de su neutralidad, el contratista puede encontrarse en un dilema al tratar de elegir entre dos gremios para hacer un trabajo determinado. El gremio que no resulte favorecido puede conformarse, o la disputa puede producir "tortuguismo" en otro trabajo. Algunas de estas dificultades pueden evitarse mediante convenios de división del trabajo con las oficinas centrales de los diferentes sindicatos de artesanos.

En cualquier discusión sobre problemas laborales debe recordarse que el trabajador de construcción es el que ejecuta los trabajos más difíciles. Además, no tiene trabajo seguro, y debe tratar de ganar salarios más elevados que el personal empleado con regularidad. Al aumentar el entendimiento entre los trabajadores y la administración de la obra, muchos de los problemas como las disputas jurisdiccionales se resolverán más satisfactoriamente.

Distribución del trabajo de construcción

El objeto de la obra y el tipo del proyecto gobiernan la elección del personal necesario. La siguiente distribución del trabajo es la típica de un proceso en la que entran fluidos. La distribución en horas de trabajo varía considerablemente en cada obra.

La obra que sirve de ejemplo se va a montar en 12 meses. Todas las cimentaciones son zapatas y no se usan pilotes. El costo total de

la obra, material, mano de obra, ingeniería, compras, sueldos y utilidades suman \$4 200 000, de los cuales \$3 150 000 incluyen materiales, equipo, sueldos y utilidades. El resto, \$1 050 000 es el costo de la construcción, principalmente de la mano de obra de montaje.

DISTRIBUCION POR OFICIOS

Número máximo de operarios en la obra = 350

Clave del oficio	Oficio	Número máximo	Horas de trabajo
Pl	Plomero	135	115 000
P	Peón	55	68 000
Cal	Calderero	30	51 000
Car	Carpintero	45	44 000
E	Electricista	35	37 000
H	Herrero	45	35 000
		Subtotal	350 000
V	Oficios varios, empleados y supervisión	40	50 000
		Total	400 000

DISTRIBUCION DE OFICIOS POR MES

Mes	Miles de horas de trabajo por mes	Número de hombres utilizados								
		Pl	*P*	*Cal*	*Car*	*E*	*H*	Subtotal	*V*	Total
1	13	8	25	2	15	8	6	64	20	84
2	14	10	35	2	25	10	8	90	20	110
3	22	22	50	2	35	15	10	134	22	156
4	28	42	45	8	38	10	20	163	28	191
5	35	54	55	8	38	16	30	201	30	231
6	50	120	50	15	40	26	35	286	32	318
7	62	135	55	35	45	35	45	350	38	388
8	48	135	35	30	20	20	25	265	40	305
9	42	130	25	30	10	29	20	244	35	279
10	35	110	25	15	10	29	10	199	30	229
11	31	90	30	10	5	25	10	170	25	195
12	20	45	35	5	5	15	5	110	20	130
	400									

Las columnas que indican el subtotal y el total son los números máximos requeridos, más que promedios. El total mensual de operarios fluctúa constantemente porque se despide algo de personal, por los cambios en la obra, condiciones adversas del clima, y por no entregar puntualmente los fabricantes el equipo. Los totales que se han dado, si trabajan constantemente excederán en 10% las horas de trabajo.

Salarios

Los salarios típicos que se dan en forma de lista en la Tabla 25-1 son los que se llaman "jornales". Los capataces o sobrestantes reciben de 12 a 25¢ por hora más que los jornaleros y los sobrestantes generales reciben 25¢ por hora más que los sobrestantes. Existen aproximadamente 300 clasificaciones diferentes de los trabajadores sindicalizados que se emplean en las operaciones de construcción. Muchas de las clasificaciones se sobreponen. Las dadas son las más comunes en las instalaciones de las plantas de proceso comunes.

TABLA 25-1. SALARIOS DE CONSTRUCCION 1954-1955 EN EL SUROESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS

Oficio	Salario/hr	
1. Pintores	2.50 –2.75 dólares	
2. Camioneros	1.615–1.70	
Bodegueros	1.70	
3. Peones	1.60 –1.80	
4. Pulidores de concreto	2.625	
Estos operarios (del Núm. 1 al 4) reciben un salario igual a una y media veces los anteriores por tiempo extra, excepto los domingos y los días de fiesta autorizados en los que se les paga tiempo doble.		
5. Electricistas	3.00	1% para el fondo de beneficencia, $0.075/hr salud y bienestar
Estos operarios (Núm. 5) reciben tiempo y medio de las 4:30 PM a las 10:00 PM, de lunes a viernes. Todas las horas después de las 10:00 PM, el sábado, domingo y días de fiesta se pagan como tiempo doble. Si después de las horas de trabajo se llama al personal a su casa, se le paga tiempo doble de casa a casa, es decir, se le paga el tiempo del recorrido y el de trabajo.		
6. Herreros	2.90	
7. (Refuerzo) fierreros	2.65	
8. Carpinteros	2.625	
9. Montadores	2.875	
10. Operadores:	1.975–2.75	
De grúas grandes, tractores, plumas	2.75	
Engrasadores	1.975	
11. Caldereros	2.975	Salud y bienestar $0.075
12. Especialistas en asbesto	3.0625	Salud y bienestar $0.075
13. Plomeros	3.10	
14. Albañiles pegando ladrillos	3.45	
Estos operarios (Núms. 6 al 14) reciben tiempo doble en todos los tiempos extras.		
15. Hojalateros	2.85	
Estos operarios (Núms. 15) reciben tiempo y medio por las tres primeras horas extra en los días ordinarios de trabajo y por las primeras cuatro horas el sábado. Todo el tiempo extra, fuera del anteriormente establecido, se paga doble.		

OPERACIONES DE CONSTRUCCION

Todos los ingenieros proyectistas deben aprovechar la primera oportunidad para observar el montaje, del principio al fin, de una planta de proceso. Para entender muchas operaciones complicadas es necesario presenciarlas.

El montaje de una planta debe proseguir con el mínimo de retraso y los que visitan una obra quedan invariablemente impresionados con la actividad que reina en el lugar.

Preparación del terreno

El terreno, que puede estar lleno de árboles, matorrales y piedras grandes, cuando lo "ataca" una cuadrilla de construcción cambia su aspecto con increíble rapidez. Luego que los topógrafos trazan los linderos de la planta y los puntos de referencia (véase el Cap. 22) entran grandes máquinas para mover tierra, como bulldozers y palas mecánicas a arrancar árboles y a nivelar lomas y bajos. En un solo día cambian completamente el aspecto del lugar. En los días siguientes la actividad se incrementa y nuevos trabajadores llegan a aumentar el personal de construcción.

Hincado de pilotes

El hincado de pilotes (véase el Cap. 22) debe comenzar tan pronto como sea posible, para que pueda terminarse antes de que dé principio el trabajo de cimentación. De esta manera, puede evitarse el daño al concreto fresco. Si se va a pilotear una gran superficie, deberá quitarse la tierra vegetal cuando se conforme el terreno abajo de la elevación proyectada para el cabezal de pilotes. Así, el hincado de los pilotes puede seguir inmediatamente y no será necesario hacer ninguna excavación adicional alrededor de éstos.

Edificios provisionales

Durante los primeros pocos días de construcción, el número de trabajadores es pequeño y los servicios que necesitan también lo son. Sin embargo, al proseguir la obra, el número aumenta; llegan escribientes y personal de oficina, y comienza la entrega de equipo. Son necesarios edificios para alojar la afluencia de personas y equipo.

Estos edificios son provisionales y deben cambiarse de lugar o tirarse al terminar la obra, pero deberán ser adecuados para las necesidades de ésta. Se construyen de madera o de armazones de acero, con techo y paredes de aluminio o de acero.

Aunque el número de edificios varía con el tipo de obra, los siguientes son los típicos:

a. Oficina de construcción: de 140 a 190 m², para alojar al superintendente general, al ayudante, al jefe de oficina, al jefe de tomadores de tiempo, al agente de compras, a una enfermera recibida y 6 u 8 empleados y taquígrafas.

b. Cobertizos para la fabricación de tuberías, carpintería, e instalaciones eléctricas.

c. Vestidores: con lavabos y lavadoras de ropa. Deberá destinarse un espacio separado para cada oficio; pueden ponerse en la planta baja de un edificio de dos pisos, cuando el superior se usa para oficinas.

d. Cuarto de herramientas: Con superficie de 75 a 95 m², que se usa para guardar y revisar las herramientas de mano, suministros y equipo portátil.

e. Bodega: que se usa para almacenar el equipo de la planta que deba protegerse de la intemperie; válvulas, tubo pequeño y conexiones para tuberías, conexiones para conduit, cemento, y aislamientos.

Varios edificios grandes que tengan espacio para alojar varias dependencias resultan por lo general más baratos que muchos edificios separados. Muchos contratistas han encontrado económicos los edificios portátiles de acero, especialmente cuando los espacios necesarios son pequeños.

Abastecimiento provisional de agua

Mucho antes que se construya el servicio de agua permanente para la planta se instala un servicio provisional casi al empezar la obra, para poder disponer de agua para beber, para el concreto, para abastecer el equipo operado con vapor de agua y para protección contra incendios. A veces resulta conveniente el sistema de protección contra incendios de manera que pueda usarse como sistema de distribución para la construcción. Si queda cerca una ciudad, puede acarrearse a la obra el agua para beber, evitando así el gasto adicional de la cloración.

Desviaciones de carreteras y espuelas de ferrocarril

Cuando se están construyendo los edificios provisionales, otras cuadrillas de trabajadores construyen espuelas del ferrocarril para llevar el equipo grande a la obra y calles para dar acceso a todas las partes de la obra a camiones y equipo de construcción.

Se trazan los caminos de la planta, se quita la tierra vegetal, se compacta y se rellena con arena y grava. Sin embargo, el pavimento, especialmente el que se hace con material blando como el macadam se construye al final de la obra para evitar dañarlo con el equipo de construcción.

Si no es necesaria una espuela permanente de ferrocarril para la planta, con frecuencia se construye una temporal cuando se va a enviar el equipo grande por ferrocarril. Empleando este método, puede levantarse el equipo directamente del carro de carga e instalarse. No es necesario ponerle balasto a la espuela provisional, pero pueden soldarse los tramos de rieles contraventeándolos con elementos es-

tructurales, de manera que se puedan mover tramos largos sin que pierdan su alineamiento.

Las excavaciones

Una vez que se han construido los servicios provisionales puede proseguir a toda velocidad la construcción. El siguiente paso lógico es completar en lo posible las excavaciones, porque los servicios subterráneos y las cimentaciones se construyen más cómodamente antes de comenzar otros trabajos.

Los topógrafos trazan las excavaciones, y se centra la mayor parte del esfuerzo en hacerlas. Es cuando se lleva equipo de todos los tipos: dragas de arrastre, palas mecánicas, escrepas, bulldozers, zanjadoras, y varios aparatos para escarificar y compactar. Cuando se operan estas máquinas hábilmente pueden terminarse las excavaciones en días, lo que hubiera requerido semanas si se hacen a mano. Sin embargo, será necesario hacer a mano algún trabajo, en los lugares congestionados, pero aun éste se facilita por medio de herramientas neumáticas portátiles, y, a veces, puede evitarse el trabajo de mano usando palas hidráulicas portátiles de autopropulsión.

Durante y después de la excavación, la tierra extraída que no se pueda usar para rellenos se lleva fuera del lugar, para que quede éste tan despejado como sea posible y listo para la instalación de los servicios subterráneos.

Instalación de los servicios subterráneos

Al completar las zanjas, los plomeros comienzan la tarea de instalar las tuberías subterráneas, y los electricistas el conduit y el cable subterráneos.

El método de instalación de los tubos varía con el tipo. El tubo de hierro fundido de macho y campana como se hace para el agua, los de alcantarillas de los procesos y drenes, se tienden sobre una cama de arena para asegurarle un apoyo continuo. Las juntas se calafatean con yute solo o saturado de brea y se cubre cuidadosamente con plomo fundido. Después de hacer las uniones, se compacta un suelo firme alrededor de la mitad inferior del tubo, la zanja se rellena y el suelo se apisona.

El tubo de hierro fundido con juntas mecánicas, que se usa con frecuencia para el agua, se tiende de igual manera, excepto en la forma que se hacen las juntas, que requieren solamente colocar un empaque y apretar tornillos.

El tubo hecho con una mezcla de asbesto con cemento puede usarse en vez del de hierro fundido para algunos servicios. Las uniones constan de un collar y un anillo de hule, que se pueden hacer en la décima parte del tiempo necesario para las juntas con plomo.

Generalmente se usa tubo de barro vidriado para los drenajes sanitarios y los drenajes de los líquidos corrosivos de los procesos. Las juntas se hacen con cemento puro* o con mastique resistente a la corrosión. Los tubos de acero al carbono que se van a instalar subterráneamente primero se cubren y luego se envuelven. Después que los soldadores completan su trabajo, se limpia y se cubre con una pintura anticorrosiva y luego con bitumastic, y finalmente se envuelve con fieltro embreado o con fibra de vidrio embreada. Si la cantidad de tubo que se va a envolver es grande, se hace con una máquina que se mueve a lo largo de la zanja, que envuelve y baja el tubo al fondo de la zanja.

Todas las juntas subterráneas que no llevan rosca o tornillos se protegen contra las fugas y el ariete hidráulico por medio de anclas de concreto. La compactación del suelo que queda alrededor de la junta no es suficiente para soportar los esfuerzos producidos por los aumentos instantáneos de presión.

Conduit para instalaciones eléctricas

El conduit de acero se corta, se le hacen roscas y se dobla con herramientas semejantes a las usadas por los plomeros. A causa de su ligereza y lo delgado de sus paredes, sin embargo, su manejo y fabricación son muy sencillos. Después de cortarlo y de hacerle rosca, se le quitan todos los filos, porque pueden dañar el forro del cable cuando se introduce. Después se baja el conduit al fondo de la zanja y se une con coples.

Se introduce el cable en el conduit entre los registros por medio de malacates movidos con aire comprimido o a mano, usando un lubricante para reducir los rozamientos. Para evitar que el cable se dañe, se comprueban cuidadosamente las tensiones con que se introduce por medio de dinamómetros, cuando se considera que la tensión es elevada.

Después de instalar el cable se prueba el aislamiento con un instrumento que aplica voltajes elevados a través del aislamiento, que indican la resistencia del mismo. Supervisa la prueba un ingeniero electricista competente, como también todo el equipo eléctrico y la instalación.

Se vierte concreto de color rojo alrededor del conduit y después que fragua, se rellena la zanja y se apisona. El color rojo es muy visible y sirve para advertir a los trabajadores cuando se hacen excavaciones alrededor del conduit.

El único trabajo eléctrico subterráneo adicional que se hace cuando se está ejecutando el que se indica en el párrafo anterior, consiste en la instalación de sistemas de conexión a tierra y de protección catódica. El cable desnudo para tierras, ya sea sólido o de alambre

---

* Cemento sin agregados.

trenzado, se tiende directamente en el terreno y se lleva a la superficie en puntos predeterminados para conectarlo a los equipos. El alambre aislado que se usa para protección catódica se conecta eléctricamente al tubo subterráneo que va a protegerse y se lleva a la superficie para conectarlo al sistema de protección catódica.

Construcción de los cimientos

Los cimientos se cuelan luego que la tubería subterránea y el conduit se han completado en sus inmediaciones. Los cimientos grandes requieren varios colados y el trabajo en un solo cimiento puede durar una semana o más.

Los detalles de estas operaciones se describen en el Cap. 22. Una vez que ha comenzado un colado de concreto, debe continuarse sin interrupción. Por tanto, el esfuerzo mayor de las fuerzas de construcción y supervisión lo hacen en las operaciones de colado.

Montaje de una pluma con tirantes

Se construye también un cimiento para la pluma con tirantes que debe instalarse en seguida con el objeto de poder colocar el equipo en su lugar. El montaje de una pluma con tirantes es una operación importante, que a menudo requiere 3 000 horas-hombre de trabajo. La pluma (Fig. 25-1) consiste en un mástil vertical de acero estructural, una pluma, y una máquina elevadora. Con frecuencia el mástil tiene una altura de 60 m o más y se mantiene en su posición mediante 6 u 8 tirantes que parten de su cúspide en dirección radial y terminan en el suelo, donde cada tirante está conectado firmemente a un "muerto". Los muertos consisten en tramos de tubo grueso enterrados en dirección perpendicular al tirante y ahogados en concreto.

La pluma está conectada con pasadores al mástil cerca de su pie. En el extremo inferior del mástil va una unión de rótula, cuya base está apoyada y firmemente atornillada a una cimentación de concreto hecha para la pluma. El extremo superior de la pluma se eleva o se baja por medio de cables gruesos que pasan por un grupo de poleas en la pluma y en el mástil, y de allí a la máquina elevadora. Otro cable y otro grupo de poleas va de la pluma a la carga para levantarla verticalmente. En el extremo inferior del mástil va un aparato en forma de rueda para hacer girar el mástil y la pluma. De esta manera se puede levantar la carga con la pluma extendida, luego moverse horizontalmente levantando la pluma o haciendo girar el mástil. La máquina elevadora puede tener un motor de vapor, uno diesel, o uno eléctrico.

Pueden levantarse cargas de varios cientos de toneladas, dentro del radio de la pluma, hasta alturas de 53 m o más. Las plumas se construyen de varios tamaños, según el área de trabajo, la altura de los equipos, y las cargas que hay que levantar.

Los planeadores experimentados de montajes deben elegir la posición adecuada de la pluma, para que pueda usarse lo más posible. Como su cimentación, los diferentes cables elevadores que van a la máquina elevadora, y la misma máquina requieren mucho espacio, la instalación de parte del equipo de proceso tiene que esperar a que se desmonte la pluma. Por tanto, su posición puede tener algún efecto en la construcción final.

Montaje de estructuras de concreto reforzado elevadas y de acero estructural

Antes de que pueda instalarse la mayor parte del equipo deben completarse las estructuras principales. En éstas están incluidas las de concreto reforzado, que se construyen de manera semejante a las cimentaciones haciendo colados sucesivos, y las estructuras de acero.

Las piezas fabricadas para las estructuras de acero se marcan cada una de ellas de acuerdo con un sistema de numeración usado por la industria. Los fabricantes proporcionan dibujos de montaje, indicando con estos números la posición correcta de cada pieza. Estos dibujos de montaje deben llegar con el acero o antes, porque pueden servir para descargar las piezas de acero en el orden más conveniente.

Además, las piezas de acero se identifican con frecuencia por colores que indican el área en la que se va a usar el acero.

Los miembros de acero estructural se suben a su lugar por medio de una pluma con tirantes o de una grúa grande. Los miembros se arman con tornillos de montaje provisionales hasta que se hacen las conexiones permanentes. Cuando se han montado miembros suficientes para que den estabilidad a la estructura, se alinea y nivela con un tránsito y un nivel y se sostiene en su posición correcta por medio de cables, hasta que se completan las conexiones permanentes.

Para las conexiones permanentes se emplean los remaches, los tornillos, o la soldadura* en las superficies planas de dos perfiles estructurales de acero.

La cuadrilla de remachadores consta de un operador para la remachadora neumática, una persona "entibador" que empuja el extremo opuesto del remache con un bloque de acero pesado, otra que recibe el remache y lo coloca en el agujero hecho con punzón o taladro, y otra que calienta los remaches. El "calentador de remaches" puede trabajar para dos o más cuadrillas. El calentador arroja los remaches calientes al rojo blanco a un operario que los apara en una taza cónica de metal (algunas veces una cubeta para agua), saca cada remache con unas pinzas y lo coloca en el agujero. Inmediatamente se coloca el martillo neumático contra uno de los extremos,

* El American Institute of Steel Construction establece los requisitos necesarios para el montaje de acero estructural.[5]

y el entibador en el otro y prosigue el remachado. El martillo neumático y el entibador tienen una matriz con la forma de la cabeza de los remaches. Se usan por lo general de preferencia las cabezas semiesféricas a las otras formas. La operación es esencialmente un proceso de forjado en caliente en el que se obliga al remache a llenar el agujero. Cuando se enfría el remache se contrae y aprieta juntando los miembros de acero.

Si los remaches se calientan excesivamente, pueden romperse en el interior cuando se colocan. Se pueden descubrir los remaches rotos golpeando cada uno de ellos con un martillo. El remache roto da un sonido sordo que se descubre con facilidad. Los remaches defectuosos descubiertos de esta manera se quitan con herramientas neumáticas y se reemplazan.

La cuadrilla usual de remachadores de cuatro hombres puede reducirse a dos para hacer el atornillado permanente del acero estructural. Los miembros estructurales se alinean por escariado y usando un perno ligeramente mayor que el agujero en que se va a introducir éste. Se requiere pericia para obtener una conexión fuerte.

Existen en el mercado muchos tipos nuevos de tornillos. Unos tienen el vástago estriado con el diámetro exterior ligeramente mayor que el agujero para el perno. Cuando el perno se clava, las estrías se forjan en el agujero llenando todo el espacio. Estos pernos fuerzan el alineamiento del acero estructural. En general, se atornillan solamente las estructuras secundarias y los miembros de acero galvanizado, pero al ir apareciendo nuevos perfeccionamientos en el atornillado, el de las grandes estructuras será más popular.

Después de meter el tornillo se aprieta la tuerca y el tornillo se estira. Los tornillos defectuosos y los remaches se descubren de la misma manera.

El acero estructural se suelda en el campo con equipo ordinario para soldar. Dos placas planas se colocan juntas y se sueldan con un cordón de soldadura a lo largo de sus bordes o usando soldaduras en tapón a través de agujeros hechos en una de las placas. También se utilizan las soldaduras al tope. Si se hacen en un taller se utilizan aparatos sujetadores especiales o mordazas para sostener las piezas en su posición correcta. Los miembros estructurales soldados en el campo se sostienen en su posición correcta por medio de los tornillos de montaje.

Las juntas soldadas se rompen en algunos sitios para comprobar la penetración de la soldadura y su calidad. Las defectuosas se arrancan y se vuelven a soldar.

Montaje del equipo principal

Es más sencillo instalar el equipo pesado antes que el equipo menor asociado; por tanto, después que se montan las estructuras de apoyo empieza la instalación del equipo principal.

Al trabajo de levantar y colocar en su lugar el equipo se llama armado. Las técnicas del armado se han ido formando a través de los siglos y se han mejorado con los nuevos materiales y maquinaria. El equipo que se va a levantar se sostiene por medio de eslingas de alambre de acero. Según la carga, una grúa de orugas, una pluma montada (Fig. 25-1), plumas de poste (Fig. 25-2), varias grúas portátiles montadas en camiones, y aun diferenciales de cadena pueden usarse para levantar.

El equipo grande que se va a colocar en el suelo o cerca de él puede arrastrarse sobre rodillos de madera o tubos a la posición deseada. En estos casos, se protege la base del equipo con vigas de

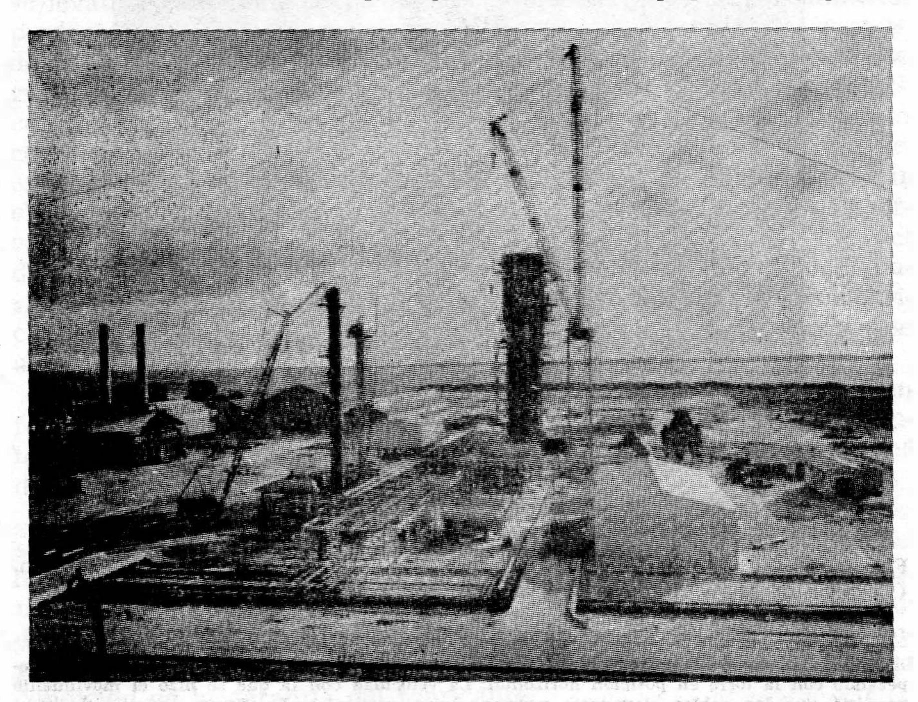


FIG. 25-1. Pluma montada (a la derecha) y grúa de orugas (izquierda) en la obra. (Cortesía de M. W. Kellogg Company.) Nótense los tirantes.

madera llamadas patines. Cuando la altura a que se va a levantar un equipo pesado es pequeña se pueden usar gatos de gran capacidad.

La maniobra de levantar equipo pesado es probablemente la fase más interesante de la construcción. Requiere operadores muy hábiles y ayudantes. Para levantar y colocar con precisión una pieza de 200 toneladas de un equipo, por ejemplo, se requieren nervios fuertes y una gran confianza. El operador de la máquina elevadora controla su grúa por medio de señales hechas con la mano por un ayudante parado cerca de la carga. Estas señales, lo mismo que todas

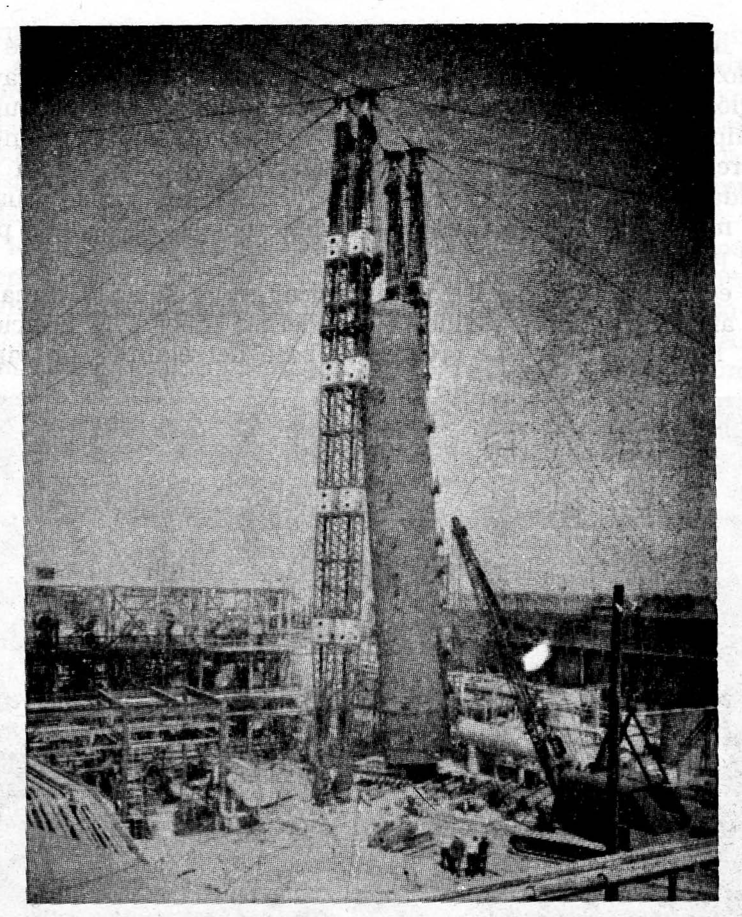


FIG. 25-2. Uso de plumas para montar una torre de destilación de 360 ton. (Cortesía de M. W. Kellogg Company.)

Nota: El pie de la torre descansa en un patín que se hizo caminar sobre rodillos, empezando con la torre en posición horizontal. La velocidad con la que se hizo el movimiento permitió que los cables elevadores permanecieran verticales. La figura muestra la torre suspendida en una posición casi vertical, precisamente antes de que se le quitara el patín y fuera colocada sobre su cimiento.

las fases de la operación de la grúa, las ha uniformado la American Standards Association[1] porque las malas interpretaciones pueden resultar costosas y peligrosas. En las maniobras importantes para levantar aun los trabajadores fogueados en la construcción se detienen para observar y admirar el trabajo del operador de la grúa.

Cualquier depósito grande prefabricado que se va a instalar verticalmente se descarga del camión o carro de carga, de modo que el equipo elevador pueda operar directamente arriba de la conexión. El movimiento de elevación debe ser tan vertical como sea posible, por-

que el equipo elevador no puede soportar grandes fuerzas horizontales. Cuando los depósitos se fabrican en la obra, generalmente se construyen dentro del radio efectivo de acción de los aparatos elevadores fijos.

El equipo puede estar provisto de orejas para amarrar los aparatos elevadores, o se pueden enrollar eslingas especiales alrededor del equipo. Las orejas para levantar, que se sueldan al depósito, simplifican el amarre de los cables elevadores. Sin embargo, aumentan el costo del depósito y dificultan la construcción de su aislamiento.

En general, casi todos los tipos de equipo cilíndrico se levantan con eslingas trenzadas de alambre de acero. Los depósitos verticales se levantan directamente sobre sus cimientos y la poca inclinación producida por los amarres ayuda a empezar a atornillar los pernos de anclaje en la base del depósito. Los pernos de anclaje para los grandes depósitos por lo general están provistos de unos casquetes cónicos con rosca, que sirven tanto para proteger la rosca del perno como para guiarlo a su posición. En los espacios entre los pernos de anclaje se ponen suplementos de placa de acero para que al colocar el depósito en sus pernos quede a nivel. Luego se aprietan las tuercas de los pernos después que se ha comprobado la posición del depósito con un instrumento (tránsito) respecto a su perpendicularidad. Cuando ya se ha comprobado que el depósito está en su posición correcta, se aprietan las tuercas y los mangos de los pernos de anclaje se inyectan de concreto.

Otras unidades del equipo como las máquinas se manejan en forma muy parecida. Aunque las máquinas pueden pesar varios cientos de toneladas no son tan difíciles de manejar como los depósitos demasiado largos y pesados.

Las máquinas se alinean y se nivelan cuidadosamente cuando se atornillan, y la inyección de concreto de las máquinas grandes se hace, por lo general, hasta que un representante del fabricante comprueba que la máquina está correctamente alineada y nivelada. Cuando las operaciones de atornillado e inyectado son completamente supervisadas por un representante del fabricante, la supervisión es una condición de la garantía del fabricante.

Instalación de tuberías

El montaje de las tuberías superficiales comienza después que se instala el equipo principal y continúa durante todo el periodo de construcción.

La mayoría de las tuberías de las plantas de proceso se conecta con platinas y soldaduras. Las diferentes piezas se fabrican en un taller y se entregan en la obra, o se fabrican en un taller de campo en la misma obra. En ambos casos, los métodos son semejantes. Se corta el tubo en tramos de longitud conveniente con una máquina cortadora o con el soplete oxiacetilénico. Un tramo de tubería o con-

junto que puede, por ejemplo, consistir de una porción recta con un codo de 90° conectado y dos boquillas en diferentes planos, se arma en un banco o en caballetes. El conjunto se alinea con cuidado y se fija con puntos de soldadura.

El conjunto así soldado se comprueba dimensionalmente y la soldadura final se hace, por lo general, con arco eléctrico. La soldadura deberá penetrar con toda perfección; no deberá contener escoria ni grietas. Resulta económico soldar todo lo que se pueda en el suelo, porque se puede dar vuelta al tubo en rodillos, y puede soldarse moviendo poco o nada el electrodo para soldar.

Después de soldar, se comprueba el alineamiento y la calidad de la soldadura. Las pequeñas desviaciones pueden corregirse sujetando el conjunto y con máquinas especiales se modifica su forma hasta darle la correcta.

Las tuberías con rosca se fabrican en la obra y siempre que sea posible, en el suelo. Las herramientas para hacer roscas y para cortar, muchas de ellas eléctricas, son parte del equipo normal de los plomeros. El plomero corta, hace roscas, y arma parcialmente el tubo en un banco de medidas aproximadas de 0.90 por 3.70 m de largo.

Al hacer roscas se usa un aceite especial para evitar el calentamiento excesivo y ayudar a que los dados de las terrajas penetren en el metal. Las roscas se hacen de acuerdo con las longitudes indicadas en los reglamentos, y se limpian cuidadosamente antes de unirlas. En las roscas se pone un compuesto especial que sirve de lubricante y de relleno. Se usan varios compuestos para las diferentes temperaturas y condiciones de los fluidos que circularán por ellas. El atornillado de las juntas de rosca deberá hacerse lentamente, para evitar que se peguen con el calor excesivo.

Los conjuntos de tubería y los tramos rectos se levantan para colocarlos en su lugar por medio de diferenciales de cadena o con eslingas atadas a las grúas. Luego se alinean las diferentes piezas. Se limpian cuidadosamente las caras de las platinas,* se ponen empaques y se aprietan los tornillos. Al apretar los tornillos se hace de manera que la tensión sea igual en los opuestos. Si se van a hacer soldaduras en el campo, se usan abrazaderas especiales para alinear.

Las partes costosas, como las válvulas, deben manejarse con cuidado. Deberán estar bien sostenidas todo el tiempo durante el montaje y sus caras deberán protegerse para que no se dañen.

Deberá destinarse un lugar de trabajo adecuado para los plomeros que instalan los tubos elevados. Los andamios deberán ser fuertes y espaciosos, porque los plomeros no pueden alinear las tuberías gruesas con gran precisión cuando su seguridad personal está comprometida o cuando se ven obligados a tomar posturas extremadamente incómodas. Cuando se termina la tubería, se lava con agua o con

* Las juntas del tipo de anillo deben limpiarse excepcionalmente bien para asegurar un cierre hermético.

ácido, se prueba a presión, se limpia, se pinta y se aísla. La pintura del tubo aislado depende de las condiciones que imponga el proceso. En general, todas las tuberías de acero al carbono, se dejen desnudas o se aíslan, se tratan con un inhibidor de la corrosión después de limpiarlas cuidadosamente.

Identificación de los tubos

Cada unidad separada de tubería fabricada en taller lleva un número de pieza o número de proyecto en los dibujos originales. Estos números se usan como identificación y se pintan y estampan con un dado de acero en el tubo fabricado. Luego se usan los dibujos originales de proyecto como planos de montaje.

Con frecuencia se usa un código de colores para la identificación en los proyectos grandes que tienen un número de unidades de proceso que utilizan los tamaños mayores de la tubería. De todas maneras deben ponérseles marcas o números de armado para identificar las piezas. Si se fabrican varias unidades separadas, puede elegirse el color para cada unidad, para poder separar con facilidad las tuberías cuando se almacenan en patios sin buscar el número de la marca. El color se aplica cerca de cada extremo de la pieza y rodea completamente el tubo formando una banda de anchura suficiente para que se pueda ver a distancia.

Los tubos revueltos que se entregan en la obra también vienen marcados con colores cuando se reciben. El código de colores debe proyectarse de manera que indique el tamaño y tipo del tubo (sin costura de aleación). Muchos de los tubos que se compran de varios tamaños tienen que almacenarse durante varios meses. Sólo algunos talleres identifican cuidadosamente los tubos, pero puede perderse la identificación original o borrarse si existió. Las marcas de colores pueden hacerse con rapidez cuando el tubo se descarga y se ahorrará mucho tiempo en el curso de la obra.

Aislamiento

Cuando ya se ha limpiado la tubería, se prueba a presión y se aísla. El aislamiento lo hace un subcontratista con personal especializado en esta labor. Estos trabajadores empiezan el aislamiento de los depósitos casi al mismo tiempo que el de la tubería. (Véase el Cap. 19.)

Edificios

Los edificios de oficina, los vestidores, bodegas, y los edificios de talleres para las máquinas se construyen en cualquier tiempo durante la obra, conforme se disponga de personal. Los edificios para los

procesos y los cobertizos se construyen después que se han instalado los equipos principales y las tuberías grandes.

Etapas finales de la construcción

Cuando ya todo el equipo principal se encuentra colocado, se instala el equipo menor que se apoya en los aparatos más grandes. Los materiales frágiles como instrumentos, aparatos eléctricos, y tuberías pequeñas se instalan también en las etapas finales para disminuir la posibilidad de que se dañen.

Las últimas semanas de una obra de construcción son muy agitadas. El equipo se prueba a presión. Se hacen pruebas de operación en el equipo. El lugar se limpia y se pone en orden. Se desmontan los edificios provisionales, y muchos visitantes oficiales llegan a inspeccionar la planta.

Los ingenieros del contratista y del cliente que empezaron a trabajar en el proyecto de la planta un año o dos antes, pueden por fin ver una prueba tangible de sus esfuerzos. Pueden haberse mejorado muchas partes del proyecto y se puede criticar con facilidad algunas partes de la planta. Pero, cuando el equipo de construcción sale de la obra y los operadores del contratista ejecutan la prueba de aceptación del equipo y demuestran que la cantidad y calidad del producto pueden producirse con facilidad, las críticas adversas resultan fuera de lugar.

La planta está ahora lista para operar, y es un tributo al tremendo esfuerzo de un grupo formado por ingenieros químicos, mecánicos, electricistas y civiles; dibujantes, taquígrafas, contadores, compradores, operarios y mozos de oficina.

Cuando se abandona la planta en este día final, dos personas sostendrán una plática cerrada: el ingeniero proyectista y el superintendente de construcción. Estos dos hombres han hecho más que cualquiera para que la operación de la planta resulte un éxito. El ingeniero proyectista ha dirigido la obra desde los primeros procesos del proyecto. Ha sido un buen organizador y un ingeniero competente capaz de tratar con gente de preparación muy diferente.

El caballero de aspecto ligeramente preocupado a quien el ingeniero proyectista está felicitando es el superintendente de construcción, quien pronto partirá a una nueva comisión. A causa de su inteligencia, de sus grandes aptitudes mecánicas y buen criterio, no sólo ha sido capaz de construir la planta como la describían los dibujos, sino que también ha corregido, con ayuda del ingeniero proyectista, los errores inevitables que ocurren en los dibujos y datos. Ha improvisado cuando ha sido necesario, pero lo más importante es que ha terminado la obra a tiempo y que ha construido una planta que le agrada al cliente.

REFERENCIAS

1. *Cranes, Derricks and Hoists,* ASA-B30.2, American Standards Association, New York, 1943.

2. Kellogg, F. H., *Construction Methods and Machinery,* Prentice-Hall, Inc., New York, 1954.

3. Rossnagel, W. E., *Handbook of Rigging,* McGraw-Hill Book Co., New York, 1950.

4. *Standard Manual on Pipe Welding,* Heating, Piping, and Air Conditioning Contractors National Association, New York, 1951.

5. *Steel Construction Manual,* 5th Ed., American Institute of Steel Construction, New York, 1950.

6. Underwood, G., *Standard Construction Methods,* 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1931.

INDICE

— F —

— G —

— N —

— O —

— P —

— T —

— U —

— V —

— Z —